

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

На правах рукописи

Варков

Варков Артем Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
МАНИПУЛЯЦИОННЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ
НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА ДВИЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Тютиков Владимир Валентинович

Иваново – 2015

Оглавление

Введение	6
Глава 1. Определение требований и принципов построения системы управления манипуляционным роботом	10
1.1. Анализ технологических процессов и оборудования, использующих манипуляционные роботы	10
1.2. Определение технологических требований, предъявляемых к манипуляционным роботам и системе управления	18
1.3. Анализ существующих систем управления манипуляционным роботом	23
1.4. Разработка принципов построения современной системы управления манипуляционным роботом	32
1.5. Выводы	39
Глава 2. Разработка математической модели манипуляционного робота	41
2.1. Разработка кинематической схемы манипуляционного робота ...	41
2.1.1. Математическое описание кинематической схемы	41
2.1.2. Уравнения прямой задачи кинематики	44
2.1.3. Уравнения обратной задачи кинематики	47
2.2. Разработка динамической модели	50
2.2.1. Определение динамической структуры манипулятора	50
2.2.2. Определение математического базиса	53
2.2.3. Оптимизация динамической модели	55
2.3. Разработка и исследование обобщенной математической модели манипулятора	59
2.3.1. Обобщенная математическая модель	59
2.3.2. Исследование обобщенной математической модели	64

2.4. Выводы.....	69
Глава 3. Разработка и исследование системы управления	71
3.1. Разработка системы управления манипулятором.....	71
3.1.1. Особенности управления многоосевым манипулятором	71
3.1.2. Структурная схема системы управления.....	73
3.1.3. Определение критериев качества системы управления.....	74
3.2. Синтез контура положения	76
3.2.1. Разработка регулятора.....	76
3.2.2. Оценка характеристик системы управления.....	83
3.2.3. Выбор оптимальной структуры системы управления.....	89
3.2.4. Разработка алгоритма формирования траектории движения	90
3.3. Выводы.....	93
Глава 4. Разработка программного обеспечения системы управления	95
4.1. Организация структуры системного программного обеспечения	95
4.2. Разработка набора средств системного ПО для формирования управляющих программ.....	100
4.3. Разработка языка написания управляющих программ.....	103
4.4. Программное обеспечение терминального устройства	108
4.5. Выводы.....	112
Глава 5. Разработка и внедрение опытного образца СУ МР	113
5.1. Разработка аппаратных компонентов системы управления	113
5.2. Внедрение опытного образца в исследовательский процесс.....	117
5.3. Результаты исследования системы управления	119
5.4. Выводы.....	121
Основные выводы и результаты работы.....	123
Список использованной литературы.....	125
Приложения	134

Приложение 1	134
Приложение 2	135
Приложение 3	136

Используемые сокращения

БДС – блок динамических связей

БУ – блок управления

ГПС – гибкая производственная система

ДМ – динамическая модель

ДХ-представление – представление Денавита-Хартенберга

КД – контроллер движения

КС – координатная система

МР – манипуляционный робот

ОС – операционная система

ПК – промышленный компьютер

ПО – программное обеспечение

ПТ – планировщик траектории

РТК – робототехнический комплекс

СУ МР – система управления манипуляционным роботом

УП – управляющая программа

ТУ – терминальное устройство

ЧПУ – числовое программное управление

ЯП – язык программирования

Введение

В настоящее время в различных областях промышленности применяются промышленные манипуляционные роботы (МР), используемые для выполнения широкого спектра технологических задач.

Они представляют собой сложный электромеханический объект, обладающий рядом особенностей. Во-первых, МР отличаются сложной кинематической структурой, содержащей множество независимых либо взаимосвязанных звеньев. Во-вторых, изменение положения последних в пространстве оказывает влияние на физические силы, действующие на манипулятор. В-третьих, существует необходимость синхронного управления большим числом двигателей.

В связи с наличием указанных особенностей, для внедрения МР в производственный процесс требуются специально разрабатываемые системы управления (СУ). Они служат для организации взаимодействия между человеком-оператором и МР и обеспечивают выполнение процессов, необходимых для автоматизации технологической операции.

В настоящее время большинство используемых в отечественной промышленности СУ МР являются зарубежными разработками. Так как они являются закрытыми решениями, при их использовании возникает зависимость от иностранных фирм относительно поставки и технической поддержки СУ и их компонентов. Кроме того, их использование определяется функциональными решениями, заложенными производителем, что ограничивает возможности по их адаптации для использования при решении специфических задач.

В связи с этим возникает проблема импортозамещения. Существующие отечественные разработки, как правило, относятся к 70-80-м годам прошлого века, что делает их в настоящее время морально и технически устаревшими. Таким образом, задача разработки современной СУ МР, соответствующей зарубежным аналогам, является актуальной проблемой.

Помимо непосредственно разработки СУ есть необходимость интеграции МР с другими технологическими объектами, например, такими как металлообрабатывающие станки. Данная задача требует внесения изменений в архитектуру СУ.

Таким образом, целью работы является разработка и исследование системы управления манипуляционным промышленным роботом на базе контроллера движения, обеспечивающей высокое качество управления в условиях изменения динамических параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- 1) проанализировать общие подходы и определить требования к управлению манипуляционным роботом;
- 2) исследовать особенности кинематики и динамики манипулятора и сформировать его математическую модель;
- 3) разработать и исследовать систему управления манипуляционным роботом с регуляторами различного типа;
- 4) разработать аппаратно-программные средства СУ МР;
- 5) исследовать разработанную СУ МР на экспериментальном стенде.

Для решения поставленных задач использованы матричное и операционное исчисление, аппарат передаточных функций и структурных схем, методы пространственных преобразований и объектно-ориентированного программирования. Исследование синтезируемых систем выполнялось методами имитационного моделирования и натуральных экспериментов на лабораторном и производственном оборудовании.

Научная новизна работы определяется разработкой и реализацией новых подходов к решению проблемы управления промышленным манипуляционным роботом и заключается в следующем:

1) предложены структура и принципы построения системы управления манипуляционным роботом, основанной на двухпроцессорной архитектуре с применением контроллера движения и промышленного компьютера, позволяющие эффективно распределять и решать задачи расчёта траектории, логического контроля и управления электроприводами;

2) разработана обобщённая математическая модель манипуляционного робота, включающая модель для расчёта прямой и обратной задач кинематики, динамическую модель, позволяющую вести расчёт моментов, действующих на звенья, и электромеханическую модель;

3) разработан метод оптимизации расчёта динамической модели, использующей метод Лагранжа-Эйлера, основанный на минимизации времени вычислений при сохранении заданной точности, что позволяет обеспечить желаемое качество управления;

4) предложены варианты построения регуляторов положения и получены интегральные оценки качества СУ МР, которые определяют границы их рационального использования для различных режимов работы.

Практическую ценность имеют следующие результаты работы:

1) аппаратная реализация, алгоритмы и программное обеспечение СУ МР с использованием контроллера движения и промышленного компьютера;

2) структура программных средств СУ МР, реализуемых в составе двухпроцессорной архитектуры, и способы распределения вычислительных ресурсов между задачами системного и прикладного уровней;

3) методика настройки СУ МР с использованием двухкритериального подхода на основе применения различных форм тестовых сигналов и формирования заданных показателей точности и быстродействия при контурно-позиционных перемещениях;

4) формат и реализация языка программирования, основанного на структурированном представлении данных и позволяющем эффективно описывать сложные управляющие алгоритмы.

Разработанная СУ реализована в виде опытного образца, используемого для управления шестизвенным манипулятором PUMA-560.

Использование в учебном процессе. Опытный образец выполнен на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры «Электроники и микропроцессорных систем» Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина. Он используется для исследования процессов управления промышленным манипуляционным роботом на примере шестиосевого МР с последовательной кинематической схемой.

В ходе исследований материалы, посвящённые результатам отдельных этапов докладывались и обсуждались на международных конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XIV-XVI Бенардосовские чтения (Иваново 2007, 2009, 2011 гг.), на II российской мультikonференции по проблемам управления (Санкт-Петербург, 2008 г.), 8th International Symposium «Topical problems in the Field of Electrical and Power Engineering» (Пярну, 2010 г.), Riga Technical University 53rd International Scientific Conference (Рига, 2012 г.).

Разработанный опытный образец был представлен на выставке «Металлообработка» в г. Москва.

Глава 1. Определение требований и принципов построения системы управления манипуляционным роботом

1.1. Анализ технологических процессов и оборудования, использующих манипуляционные роботы

В настоящее время в различных областях человеческой жизни широко используются манипуляционные роботы (МР). Их применение позволяет повысить производительность технологических процессов, устранить присутствие людей на опасных участках, проводить операции в агрессивных средах.

Манипуляционный робот представляет собой перепрограммируемый многофункциональный манипулятор, предназначенный для осуществления определенных, заранее заданных перемещений материалов, деталей, инструментов или специальных приспособлений с целью выполнения различных работ. Важным компонентом МР является сам манипулятор – устройство для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, оснащённое рабочим органом. [13]

По своей структуре манипулятор – многозвенная машина, между отдельными элементами которой существуют механические связи. Большинство существующих в настоящее время МР используют электрические двигатели для выполнения перемещений. Для управления рабочим органом могут использоваться пневматические и гидравлические приводы.

В зависимости от области применения могут использоваться различные схемы построения механической части манипулятора. Следует разделять структуру его «руки» и «запястья».

Основная конструкция «руки» представляет собой последовательность звеньев, соединённых между собой вращательными (В) и поступательными (П) связями. По характеру и количеству связей можно выделить следующие категории организации пространственных перемещений [1, 2, 7]:

— роботы с декартовой системой координат (3П) (рис. 1.1, а);

- роботы с цилиндрической системой координат (ВЗП) (рис. 1.1, б);
- роботы со сферической системой координат (2ВП) (рис. 1.1, в);
- роботы с вращательной системой координат (nВ) (рис. 1.1, г).

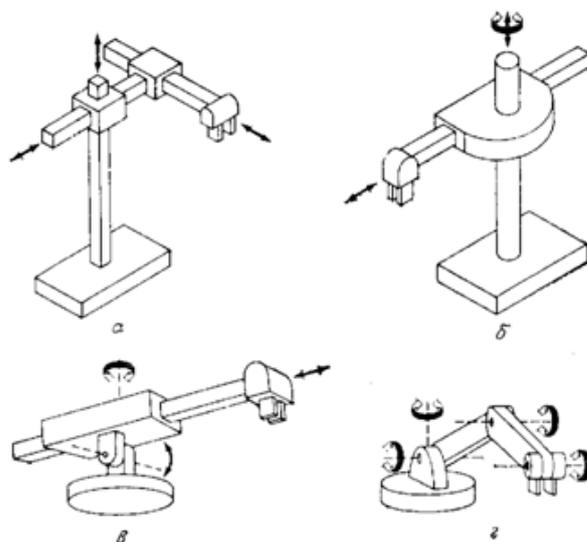


Рис. 1.1. Различные конструкции манипуляционных роботов

Кроме того, в настоящее время развиваются манипуляторы, использующие параллельные связи (рис. 1.2, а), и SCARA-манипуляторы (Selective Compliant Assembly Robot Arm) (рис. 1.2, б) [31].

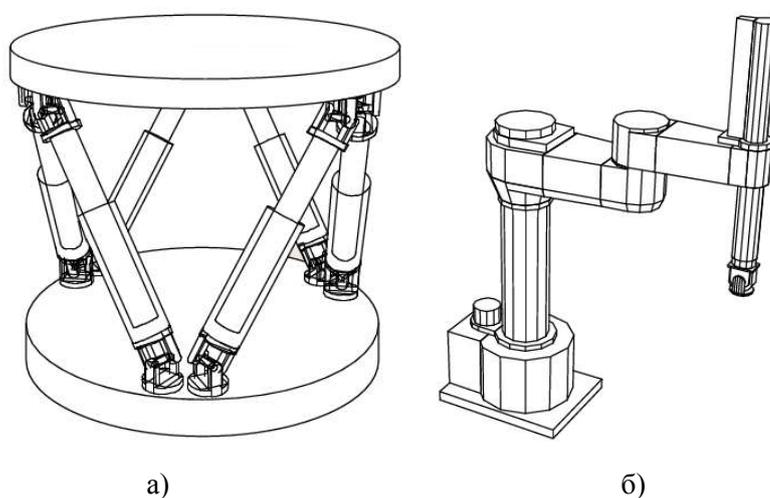


Рис. 1.2. Конструкция манипулятора с параллельными связями и SCARA-манипулятора

Большинство производимых в настоящее время манипуляторов относится к числу роботов с вращательной системой координат. Они обеспечивают наибольший объём рабочей зоны, в которой может осуществляться движение. Их

структура позволяет достигать заданного положения и ориентации рабочего органа, в том числе и при наложении ограничений на возможные перемещения, возникающих при наличии препятствий в рабочей зоне или требуемых для обеспечения безопасности эксплуатации.

Основными производителями МР являются фирмы ABB, Fanuc, Kawasaki, KUKA, Yaskawa. Из отечественных производителей можно выделить ООО «Волжский машиностроительный завод» (бывшее ПТОО «АвтоВАЗ»), производящее роботы серии ТУР. Следует отметить, что выпускаемые в настоящее время манипуляторы, как правило, обладают шестью и более степенями свободы, так как это позволяет обеспечить более удобное и точное позиционирование и ориентацию рабочего органа в пространстве.

Выбор конкретной реализации и конструкции МР определяется, прежде всего, областью его непосредственного применения. Основными направлениями их использования в настоящее время являются (рис. 1.3):

- промышленность;
- сельское хозяйство;
- космическая техника;
- медицина.

Из указанных областей применения наибольшее распространение получила промышленность.

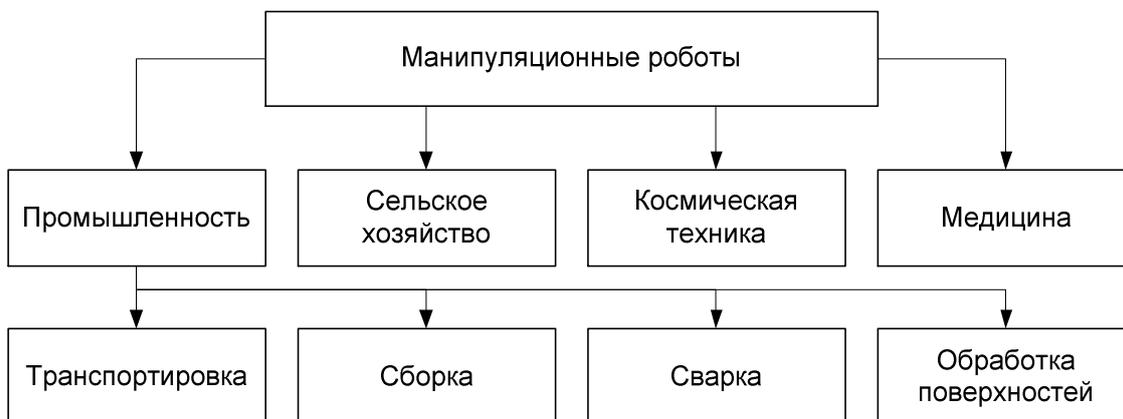


Рис. 1.3. Области применения манипуляционных роботов

Можно выделить четыре основных класса операций, выполняемых с их помощью [11, 12]:

1. Транспортировка, упаковка, палеттирование;
2. Сборка;
3. Сварка и резка;
4. Обработка поверхностей.

Транспортные операции заключаются в перемещении объектов между заданными точками. Основным показателем качества работы таких манипуляторов является точность позиционирования. В большинстве операций достаточной оказывается величина порядка 0,1 мм.

В случае, если манипулятор используется для транспортировки деталей, он выступает частью более сложной технологической операции, например, обработки на металлообрабатывающем станке. Основными требованиями, предъявляемыми к МР, в данном случае являются точность позиционирования и соблюдение ограничений на перемещение, так как операция может выполняться в ограниченной области пространства.

В качестве примера задачи, в которой рационально использование МР, можно привести производственную операцию, связанную с обработкой на станке (рис. 1.4). Манипулятор должен взять деталь со специально расположенного поддона, поместить её в зону обработки, учитывая ограничения рабочей зоны, переместить изделие по заданной траектории движения для обработки, и по завершении работы доставить в зону готовых изделий.



Рис. 1.4. Обработка изделий на станке с использованием манипуляционного робота на стекольном заводе в г. Гусь-Хрустальный

Конкретным примером может служить МР, осуществляющий перемещение деталей на конвейер (рис. 1.5). Данная операция заключается в определении положения следующего объекта, его захвата и перемещения на движущуюся поверхность.



Рис. 1.5. Транспортный манипулятор

Сборочные операции заключаются в совмещении детали и базового изделия. Основной задачей в данном случае является необходимость точного позиционирования деталей относительно друг друга. В том случае, если сборка проводится на сборочной линии, манипулятор должен не только позиционировать деталь, но и следовать за ней с требуемой точностью. Кроме того, в ряде случаев может потребоваться поддержание заданного усилия рабочего органа для фиксации объекта.

В настоящее время при сборке небольших изделий часто используются SCARA-манипуляторы (рис. 1.6). МР такого типа обеспечивают высокую скорость сборки и гибкость настройки к различным вариантам конечного продукта. Наиболее широко они используются при сборке электронных устройств. В связи с миниатюрностью компонентов, малыми размерами готовых изделий и

значительными объёмами выпуска продукции, существуют высокие требования к точности позиционирования (до 0,01 мм) и скорости перемещений (порядка 1 м/с). Это также приводит к тому, что МР должен обладать значительными вычислительными возможностями, позволяющими обеспечить выполнение указанных требований.



Рис. 1.6. Сборочный SCARA-манипулятор

При сборке крупных объектов, как правило, используются многозвенные манипуляторы, работающие во вращательной системе координат. Важными критериями качества в данном случае является обеспечение стабильной точности позиционирования (порядка 0,5 мм) и наработки на отказ (до 50000 ч). В связи с необходимостью перемещений значительных грузов, эти манипуляторы обладают высокой грузоподъёмностью (50 кг и более), что требует использования мощных двигателей.

Значительная масса перемещаемых объектов приводит к увеличению влияния динамических факторов на перемещение манипулятора, что требует усложнения структуры управления МР и повышения требований к производительности.

Сварка и резка изделий требуют от МР обеспечения не только точности позиционирования (0,05-0,1 мм), но и поддержания заданной траектории перемещения. В связи с этим возникают высокие требования не только к статическим характеристикам манипулятора, но и к его динамике. В частности, важной особенностью работы таких манипуляторов является необходимость учёта изменения его пространственной конфигурации в процессе перемещения.

Так же как сборка крупных объектов, сварка требует от манипуляторов высокой грузоподъёмности, так как навесное оборудование обладает достаточно большой массой.

Процесс сварки может проходить как стационарно (рис. 1.7, а), так и в составе сборочной линии (рис. 1.7, б). В последнем случае аналогично сборочным операциям МР должен не только выполнять перемещения по заданной программе, но и отслеживать перемещение обрабатываемого изделия, что вносит дополнительные особенности в управление движением.

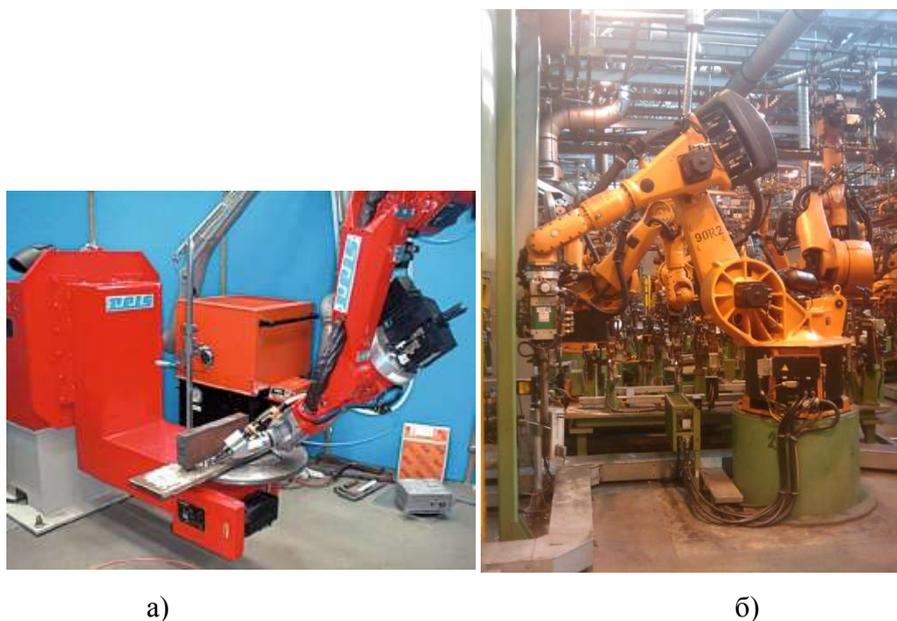


Рис. 1.7. Сварочные роботы

МР, предназначенные для обработки поверхностей, можно разделить на два класса:

1. Манипуляторы для бесконтактной обработки;

2. Манипуляторы, выполняющие силовые операции с поверхностью.

Первый класс включает такие операции как покраска (рис. 1.8, а) или очистка, заключающиеся в обработке поверхности изделия без непосредственного контакта с поверхностью. В данном случае основными требованиями к МР является поддержание постоянного расстояния от поверхности изделия. Такие МР, как правило, оснащаются датчиками расстояния от поверхности, необходимыми для соблюдения требований к качеству обрабатываемой поверхности. Кроме того, в данном случае используется тяжёлое навесное оборудование, требующее использования манипуляторов высокой грузоподъёмности.

Ко второму классу относятся задачи, в которых манипулятор используется для проведения операций механической обработки детали (рис. 1.8, б). В этом случае он должен быть оборудован необходимым инструментом, а его система управления должна поддерживать соответствующие алгоритмы. Непосредственные требования, предъявляемые к нему, определяются спецификой операции.

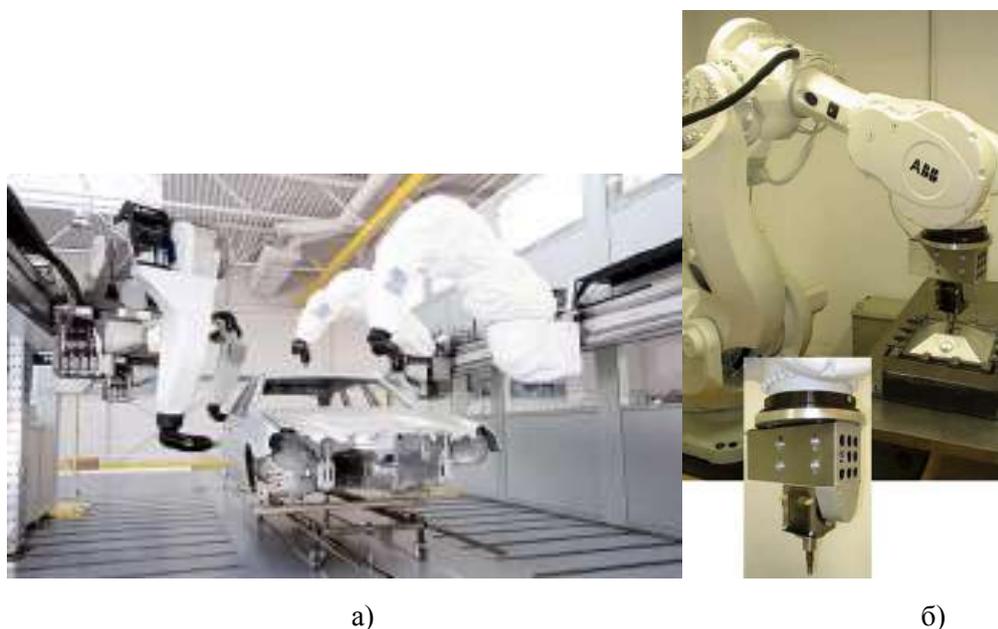


Рис. 1.8. Обработка поверхности промышленными манипуляторами

В настоящее время в промышленности, как правило, используются гибкие производственные системы (ГПС), в состав которой могут входить металлооб-

рабатывающие станки и промышленные роботы. В этом случае работа отдельных её компонентов должна быть согласована между собой. Наиболее эффективным решением в данном случае будет использование единой архитектуры для построения всех компонентов ГПС. [10, 32]

Отдельные производственные участки могут объединяться в рамках производства в сборочные линии (рис. 1.9), что ведёт к ещё большему усложнению взаимодействия между отдельными компонентами технологического процесса. В данном случае помимо взаимодействия отдельных устройств при обработке изделия возникают требования к синхронизации выполнения единичных этапов производства.

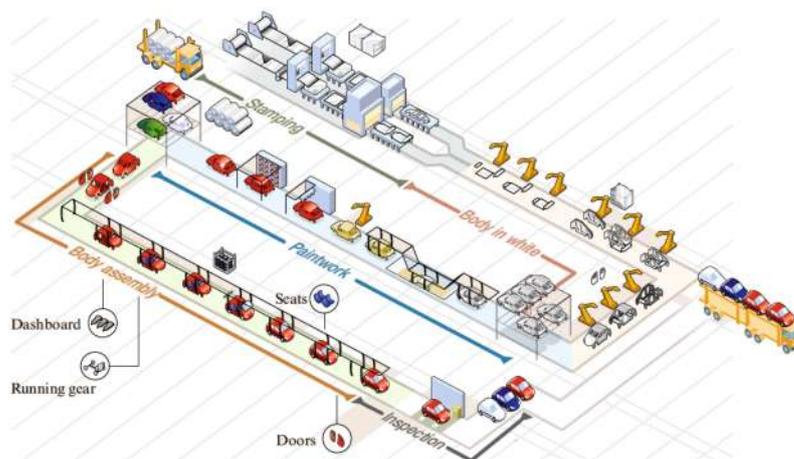


Рис. 1.9. Сборочная линия автомобильного производства.

1.2. Определение технологических требований, предъявляемых к манипуляционным роботам и системе управления

Согласно проведённому анализу, основными задачами манипуляционного робота являются позиционирование рабочего органа и следование заданной траектории.

Позиционирование или перемещение манипулятора в заданную точку без необходимости следования определённой траектории требует учёта прежде всего кинематической структуры манипулятора. В данном случае динамические характеристики, под которыми понимаются физические силы, действующие

щие на манипулятор в целом и отдельные его компоненты, не оказывают существенного влияния на качество выполнения технологической операции. Современные общепромышленные манипуляторы обеспечивают точность позиционирования порядка 0,05-0,1 мм. Учитывая необходимость сокращения времени, затрачиваемого на перемещение и позиционирование, необходимо определить подходы к формированию траектории и профиля скорости (рис. 1.10) [6].

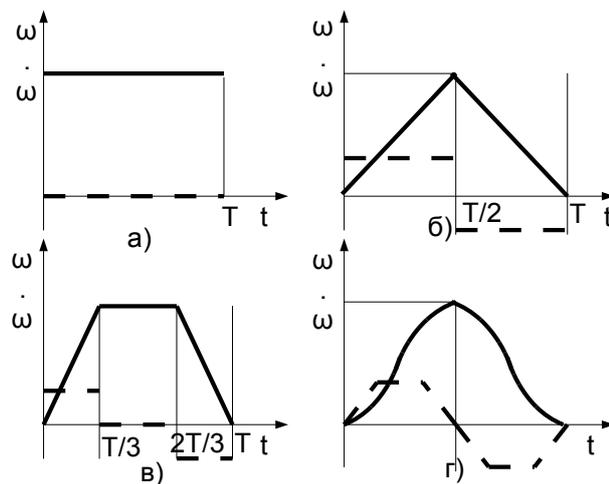


Рис. 1.10. Варианты профиля скорости перемещения

Из приведённых графиков видно, что в зависимости от выбранного закона изменения скорости меняется соотношение время/скорость выполнения операции, а также кривая ускорения (показана пунктиром). Как видно из (рис. 1.10) треугольный (рис. 1.10, б) и трапецеидальный (рис. 1.10, в) профили приводят к возникновению излома кривой ускорения в месте изменения. Использование S-кривой (рис. 1.10, г) для формирования скорости позволяет сформировать гладкую кривую перемещения без возникновения резких изменений скорости и ускорения. Такое решение позволит снизить нагрузку на механические и электрические компоненты манипулятора, тем самым, увеличив срок его эксплуатации.

Движение по заданной траектории можно рассматривать, как совокупность множества малых перемещений между отдельными точками. Исходя из этого сказанное выше о профиле скорости верно и для данной задачи. Следует отметить, что в данном случае законы изменения скорости и ускорения должны

быть определены исходя из требований соблюдения заданной точности позиционирования в любой точке траектории.

Отличительной особенностью контурных перемещений является существенное влияние динамических характеристик манипулятора на качество управления движением. Прежде всего, это проявляется в изменении физических параметров отдельных звеньев манипулятора (моменты инерции относительно сочленений, силы взаимодействий отдельных звеньев).

В зависимости от назначения МР, для осуществления перемещений используют различные виды приводов (рис. 1.11) [7, 33].

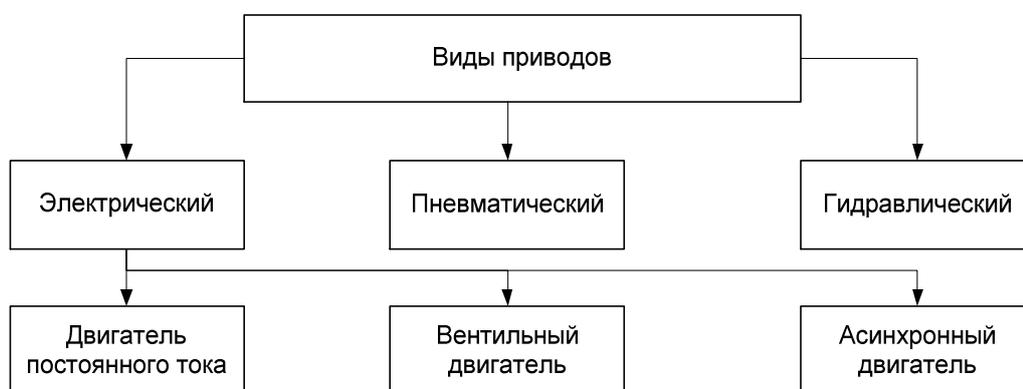


Рис. 1.11. Виды приводов, используемых в МР

В задачах, которые требуют создания значительных постоянных усилий, в частности для управления рабочим органом манипулятора могут быть использованы пневматические (для манипуляторов с малой грузоподъёмностью) и гидравлические (с большой грузоподъёмностью) приводы. Прежде всего, это относится к сборочным и транспортно-погрузочным операциям, где необходима надёжная фиксация объекта. В данном случае использование таких приводов позволит добиться требуемого результата с наименьшими затратами, но предполагает использование внешних источников давления.

Большинство существующих в настоящее время манипуляционных роботов используются для выполнения движений электрический привод. Основными его преимуществами относительно пневматических и гидравлических приводов являются [8, 9, 10]:

- высокий КПД;
- малые габариты;
- удобство управления;
- широкий диапазон мощностей.

В современных промышленных манипуляторах чаще всего используются двигатели постоянного тока (ДПТ), шаговые и вентильные двигатели. Наиболее часто применяются ДПТ и вентильные двигатели. Двигатели постоянного тока, как правило, используются в манипуляторах с малой грузоподъемностью (до 10 кг). В МР большей грузоподъемностью используются вентильные электродвигатели, позволяющие добиться большего КПД. Перспективным является использование асинхронных двигателей, обеспечивающих достаточно высокий КПД при меньших затратах.

При разработке системы управления манипулятора существенной проблемой является необходимость учёта нелинейных элементов в его кинематической структуре (рис. 1.12) [5]. Основным из них оказывается влияние сухого и вязкого трения. Также необходим учёт упругих связей между отдельными звеньями и в механических передачах от двигателей к сочленениям. Основными видами механической передачи в МР являются зубчатая и ременная.

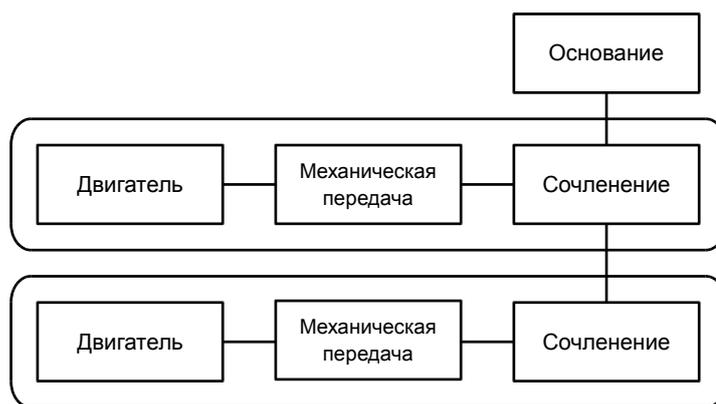


Рис. 1.12. Кинематическая структура манипулятора

Следует отметить, что в технологических операциях, связанных с силовой обработкой поверхностей, существенные упругие связи возникают при взаимодействии рабочего органа с поверхностью. Кроме того, упругие связи оказыва-

ют заметное влияние в МР с высокой грузоподъёмностью (порядка 500 кг и выше).

Если рассматривать МР в целом, то влияние кинематических нелинейностей оказывается значительно меньшим по сравнению с динамическими [46]. Исходя из этого, можно принять связи между отдельными его элементами жесткими. При этом все эффекты от взаимодействия звеньев учитываются в динамической модели манипулятора.

Для управления МР необходимо наличие измерительных датчиков для определения переменных состояния его электромеханической модели. Основными измеряемыми переменными для каждого звена являются:

- угловая координата;
- угловая скорость;
- ток нагрузки.

Угловые величины позволяют определить положение звена МР в пространстве. Так как в механической структуре манипулятора присутствует редуктор, то для пересчёта угловых координат и скоростей двигателей в соответствующие величины звеньев, необходимо учитывать коэффициенты редукции.

Определение линейных координат требует решения задач кинематики для перевода угловых координат звеньев в набор декартовых координат и углов Эйлера, определяющих текущее положение и ориентацию рабочего органа в пространстве. Определение точности позиционирования для манипуляционных роботов, как правило, нормируется в линейных координатах [14]. Для большинства технологических операций требуемая точность варьируется в пределах 0,1-1 мм.

Помимо положения и скорости для управления манипулятором может потребоваться измерение моментов сил, действующих на звенья. Это наиболее важно для силомоментного управления.

Измерение тока нагрузки двигателя позволяет косвенно определить момент на валу двигателя и произвести на основе полученной информации вы-

числение динамических характеристик манипулятора. Измерение тока и пересчёт его в момент позволяет избежать необходимости использования специальных датчиков момента.

Системы с очувствлением рабочего органа требуют использования дополнительных датчиков, позволяющих измерить усилие, возникающее при его взаимодействии с обрабатываемым объектом или поверхностью.

1.3. Анализ существующих систем управления манипуляционным роботом

В настоящее время наиболее распространённые СУ МР производятся фирмами АВВ [15], Fanuc [16], KUKA [17], Yaskawa Motoman [18], Kawasaki [19] (рис. 1.13). Для решения указанных задач в своих разработках они используют закрытые проприетарные решения. Это приводит к тому, что конечный пользователь получает систему, включающую СУ МР и манипуляционный робот одного производителя. Такой подход позволяет гарантировать работоспособность конечного решения, но ограничивает возможности расширения со стороны пользователя.

Следует отметить, что каждый производитель использует свои подходы к реализации указанных компонентов. Особенности построения СУ МР приведены ниже на примере СУ МР KUKA и АВВ.

Современные СУ МР фирмы KUKA выполняются на базе промышленного компьютера, использующего ОС Windows XP с расширениями реального времени VxWorks. Для управления манипулятором применяются специализированные платы расширения, включающие плату управления осями (до 8 в базовом варианте с возможностью расширения), платы ввода-вывода и сетевого контроллера.

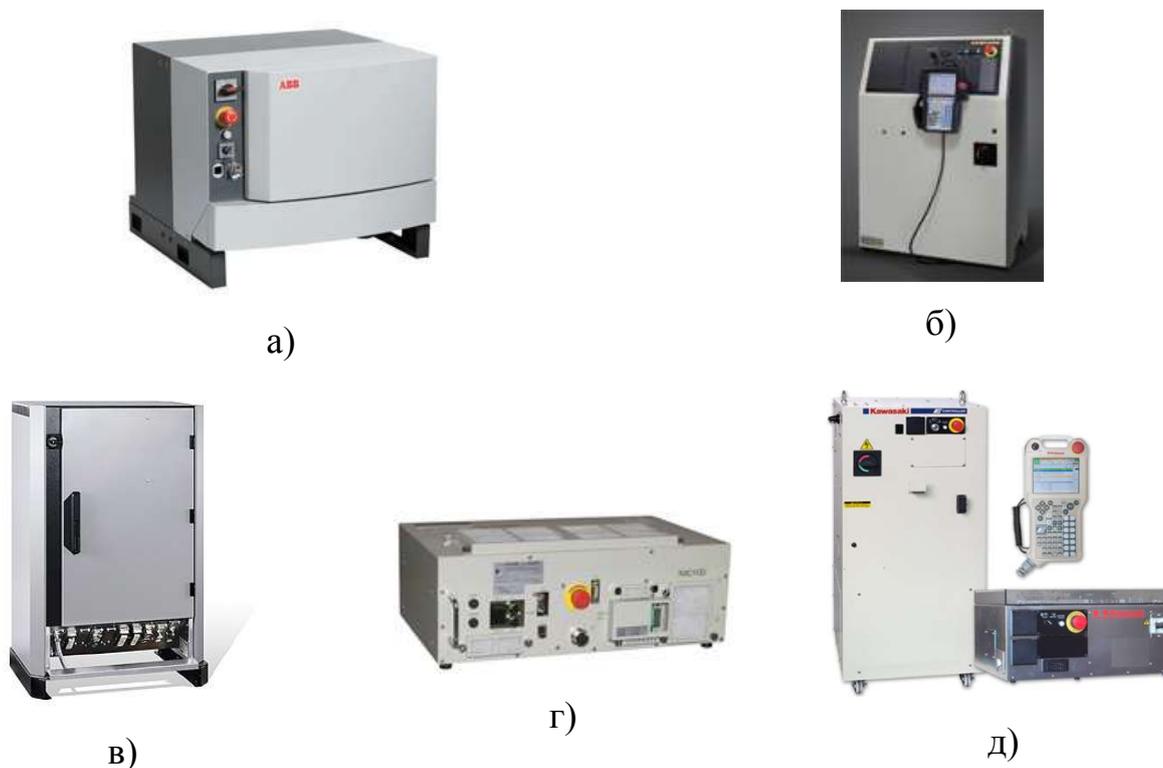


Рис. 1.13. СУ МР ведущих производителей:

а) АВВ, б) Fanuc, в) КУКА, г) Yaskawa Motoman, д) Kawasaki

Управление МР осуществляется при помощи специализированного переносного терминала. Для осуществления обмена данными используются протоколы Ethernet, Modbus и DeviceNet. [20, 21, 22]

Манипуляторы фирмы КУКА оснащаются серводвигателями переменного тока, в качестве датчика положения используется абсолютный энкодер. В зависимости от грузоподъёмности технические характеристики могут варьироваться (таблица 1.1).

Таблица 1.1. Сравнение двигателей, используемых в роботах фирмы КУКА

Грузоподъёмность, кг	Мощность, кВт	Скорость вращения (ном/макс), мин ⁻¹	Разрешение датчика, имп/об.
15	0,78	3000	512
150	3,77	3000/4200	512
210	4,87	3000/3500	512

Погрешность позиционирования, обеспечиваемая манипулятором, также варьируется в пределах 0,05-0,15 мм.

Пользователь может разрабатывать программы для решения технологических задач с использованием языка KRL [23], позволяющего в структурированном виде описать требуемый алгоритм. При этом есть доступ к операциям формирования траектории (включающим позиционное, линейное, круговое и сплайновое перемещения с заданием требуемой ориентации рабочего органа), управления входами/выходами оборудования, а также управления специальными сигналами. Также роботы фирмы KUKA поддерживают механизм определения динамических и кинематических параметров манипулятора через набор системных переменных.

СУ МР фирмы ABB используют принципы модульного построения, при котором к одному центральному контроллеру через интерфейс Ethernet может быть подключен ряд контроллеров, предназначенных для управления отдельными манипуляторами. Такое решение позволяет организовать централизованное управление группой манипуляторов. Той же целью может быть также использован переносной пульт.

Роботы ABB используют серводвигатели переменного тока, мощность которых варьируется в диапазоне 1 кВт – 4,5 кВт для ряда грузоподъемностей 3-150 кг. При этом обеспечивается точность позиционирования 0,06-0,1 мм.

Программирование роботов ABB осуществляется с использованием языка RAPID [15], позволяющего разрабатывать алгоритмы управления с возможностью синхронизации нескольких параллельно выполняющихся задач, а также использовать стандартные циклы. Также в языке предусмотрены стандартные средства для определения координатных систем и разрешения сингулярностей при позиционировании манипулятора. По сравнению с языком KRL он позволяет проще реализовать синхронное выполнение нескольких программ, но при этом имеет ограниченные возможности по их структурированию.

Помимо указанных особенностей, современные СУ МР часто поддерживают алгоритмы адаптивного управления, опирающиеся на информацию, получаемую посредством различных датчиков, измеряющих физические характеристики манипулятора, а также оценивающих изменения во внешней среде. Это могут быть как встроенные в манипулятор измерители, так и периферийные устройства, предназначенные для сбора и анализа данных при помощи специальных алгоритмов.

В настоящее время наиболее распространённой отечественной разработкой является СУ МР «Сфера-36», предназначенная для управления манипуляторами РМ-01 (PUMA-560) [24]. Она представляет решение, основанное на использовании МикроЭВМ аналогичной «PDP-11», и обладает возможностями простого ввода текстовых программ и записи последовательности перемещений в режиме обучения. «Сфера-36» обладает базовым набором функциональности для перемещения манипулятора в режиме позиционного и контурного управления, а также управления пневматическим схватом. Существенным недостатком является необходимость использования аналоговых сигналов для управления и организации обратной связи с манипулятором, что снижает качество управления, так как линии управления могут быть подвержены помехам. Кроме того, данная разработка к настоящему времени морально и технически устарела, и не соответствует современным требованиям.

Из современных отечественных исследований можно выделить можно выделить работы С. Л. Зенкевича, А. С. Ющенко [4], Е. П. Попова Е. П. [26], В. С. Кулешова, Н. А. Лакоты [27, 28], Е. И. Юревича [2]. В области промышленного применения манипуляторов, проводившихся в нашей стране следует отметить разработки МГТУ «Станкин», ЦНИИ Робототехники и технической кибернетики, ООО «ВМЗ», ООО «Робокон» [28, 29, 30].

Основные направления исследований в данной области посвящены принципам управления манипуляционными и мобильными роботами, анализу подходов к управлению с использованием методов динамического и логического

управления, а также методам проектирования робототехнических систем с компьютерным управлением. Кроме того, отдельным направлением является разработка систем интеллектуального управления роботами.

Проводимые исследования ориентируются как на теоретические изыскания, так и на получение практических результатов. В качестве результатов проведенных работ можно выделить серию манипуляторов ТУР (рис. 1.14) по своим характеристикам близких к зарубежным аналогам. Данная разработка аналогична решениям, используемым в манипуляторах фирмы KUKA, что позволяет вести замещение оборудования, используемого на технологических линиях ОАО «АВТОВАЗ».

Система управления построена на основе открытой модульной архитектуры, позволяющей подключать различное управляющее и периферийное оборудование к центральному контроллеру, выполненному на основе ПК посредством различных цифровых интерфейсов, таких как RS-485, ModBus, Sercos или UCSNet.



Рис. 1.14. Робот ТУР-30 в составе роботизированного комплекса с вертикально-фрезерным станком МС-400

Осуществленная в этой разработке полная реализация СУ МР на базе ПК с ОС Windows требует поддержки жесткого реального времени, не достижимого

в данном случае. Это ограничивает возможности использования данной системы в ряде задач, требующих высокого быстродействия. Для сравнения можно привести пример СУ МР фирмы KUKA, описанные выше, которые в дополнение к ПК используют расширения, такие как VxWorks, а также специализированные архитектурные решения.

Вместе с тем, следует отметить, что большинство отечественных предприятий используют СУ МР зарубежного производства, а собственные разработки, выполненные в 80-х годах прошлого века, не соответствуют современным технологическим требованиям. Кроме того, акценты в исследованиях в последние годы сместились с промышленных манипуляторов на мобильные роботы, что подтверждается темами диссертаций, предложенных к защите за последние 10 лет, а также публикациями в специализированных изданиях.

Таким образом, возникает проблема, связанная с необходимостью разработки современной отечественной СУ промышленного МР, ориентированной на решение задач импортозамещения, а также расширения возможностей эксплуатации отечественных манипуляционных роботов.

Основываясь на проведенном анализе, можно определить общие структурные решения, используемые в современных СУ МР, и выделить следующие компоненты (рис. 1.15):

- средства программного управления, предназначенные для управления со стороны конечного пользователя и решения технологических задач;
- средства адаптивного и/или робастного управления, необходимые для управления манипулятором в условиях изменяющихся внешних воздействий и параметров;
- приводы, осуществляющие непосредственное управление звеньями манипулятора;

— средства очувствления для решения сложных технологических задач, требующих развернутой информации о состоянии рабочего пространства.

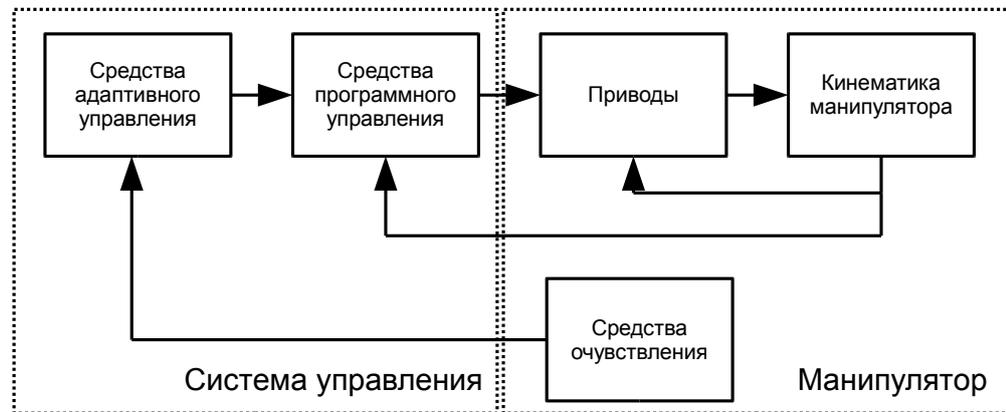


Рис. 1.15. Структурная схема СУ МР

Средства программного управления включают базовый набор алгоритмов, предназначенных для управления электромеханическими компонентами манипулятора, в первую очередь двигателями осей, а также обеспечивающих возможность задания управляющей программы конечного пользователя.

Учитывая, что современные манипуляторы используют различные типы двигателей, необходимо заложить поддержку необходимых алгоритмов управления.

Также сюда относятся различные алгоритмы интерполяции траектории, в том числе линейная, круговая и сплайновая.

Средства адаптивного управления включают средства, необходимые для учёта изменяющихся параметров манипулятора и окружающей среды. Минимальным требованием в данном случае является учёт изменения динамических характеристик в результате его перемещения. [44, 45]

Таким образом, вычисления, выполняемые СУ, являются достаточно сложными, так как требуют проведения матричных операций высокого порядка, решения задач кинематики и динамики, а также вычисления переменных состояния МР на основании измеренных данных для расчёта регулятора.

Учитывая, что современные манипуляционные роботы обладают не менее чем шестью управляемыми осями, система должна обеспечивать возможность управления ими, а также поддерживать расширение при необходимости использования дополнительных осей.

В связи с тем, что при управлении электроприводами осей манипулятора накладываются ограничения на ряд переменных (напряжение, ток, ускорение) и параметры рабочей зоны МР, то необходим алгоритм, позволяющий применять эти ограничения.

Для обеспечения требуемого качества управления СУ МР должна учитывать различные внутренние и внешние факторы (изменение пространственной конфигурации манипулятора, массы и конфигурации навесного оборудования или детали). Для этого может потребоваться введение алгоритмов управления, которые позволяют компенсировать их влияние на манипулятор. В качестве базовой функциональности в СУ МР должна быть предусмотрена возможность расчёта кинематической и динамической моделей манипулятора с целью минимизации влияния внутренних факторов, таких как взаимовлияние звеньев и изменение их моментов инерции при перемещении.

Помимо указанных требований, существует ряд факторов, учёт которых позволяет повысить удобство применения СУ МР и расширить возможности её эксплуатации.

Важным моментом при разработке СУ МР является возможность её использования совместно с другими видами технологического оборудования в составе ГПС. Чтобы добиться этого принципы построения СУ должны соответствовать общим принципам построения систем управления движением (СУД) [34, 35]. Такое решение позволит достигнуть наиболее эффективного взаимодействия между отдельными компонентами ГПС.

В связи с этим СУ должна быть оснащена средствами высокоскоростной передачи информации. Это требует наличия возможностей по согласованию и

обмену информацией, а также управления внешними устройствами. В этом случае возможны два подхода:

- использование портов ввода/вывода;
- использование сетей;

В первом случае от СУ МР требуется, прежде всего, наличие возможности расширения количества входов/выходов. Современные СУ поддерживают как правило до 2048 входов/выходов, что достаточно для подключения большинства периферийных устройств [15-19].

Локальные промышленные сети могут быть использованы для объединения нескольких СУ для совместной работы или для подключения интеллектуального периферийного оборудования.

Для выполнения управляющей программы СУ МР должна предоставлять функциональные возможности по созданию, хранению и выполнению управляющей программы. Для этого необходимы средства для ввода информации в СУ, обмена с пользователем и управления ходом отработки УП. Отсутствие единого стандарта написания УП требует разработки собственных подходов к программированию.

Пользовательский интерфейс должен позволять оператору наблюдать за работой СУ МР, выполнять необходимые операции для поддержания её в рабочем состоянии (запуск/остановка программы, наблюдение за режимами и параметрами робототехнологического комплекса (РТК)). Работа РТК может осуществляться в трёх основных режимах [10]:

- ручном – манипулятор управляется пользователем;
- автоматическом – выполняется программа;
- обучения – проводится запись управляющей программы.

1.4. Разработка принципов построения современной системы управления манипуляционным роботом

Для того, чтобы СУ отвечала требованиям, предъявляемым современным производством, она должна быть адаптируемой к применению в технологических операциях, использующих различные виды манипуляторов и периферийного оборудования. Чтобы обеспечить это, в основу разработки СУ МР следует положить принципы модульности и открытой архитектуры.

Принцип модульности заключается в возможности комплектования конечной СУ набором компонентов, наиболее подходящих к выполнению поставленной задачи. Основные составные части, представленные на (рис. 1.16), являются модулями, состав и реализация которых могут определяться конкретной задачей, выполняемой МР.

Принцип открытой архитектуры заключается в возможности конфигурирования и создания отдельных компонентов СУ конечным пользователем, использовании открытых протоколов обмена данными и предоставлении доступа к программным модулям для разработки пользовательских программ и алгоритмов.

Конкретная реализация СУ с использованием указанных принципов зависит, прежде всего, от аппаратной архитектуры и её базовой реализации.

Основными компонентами аппаратной архитектуры современной СУ МР (рис. 1.16) являются следующие:

1. Блок управления (БУ);
2. Терминальное устройство (ТУ) пользовательского интерфейса;
3. Силовые модули;
4. Периферийное оборудование.

Блок управления является основным компонентом, отвечающим за проведение расчётов перемещений, за наблюдение за состоянием системы в целом, ее отдельных компонентов и периферийного оборудования, за выполнение

пользовательских и системных программ. БУ включает средства взаимодействия между отдельными компонентами СУ.

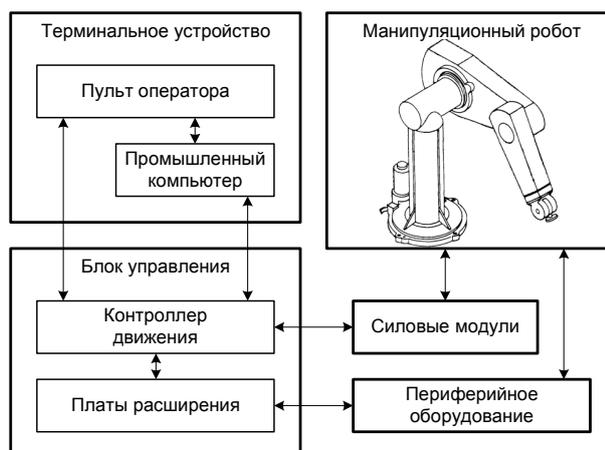


Рис. 1.16. Аппаратная архитектура СУ МР

Задачей **терминального устройства** является обеспечение взаимодействия оператора с СУ. Для этого оно должно обладать эффективными средствами ввода/вывода информации. Пульт оператора, реализует функции обмена информацией с СУ, включения/выключения системы, запуска и выполнения пользовательских программ, выбора и настройки режимов работы МР, сигнализации о его состоянии. Помимо системных задач пульт оператора должен обеспечивать взаимодействие оператора с ПО ТУ. В частности, он должен обладать средствами для ввода управляющих программ, переключения режимов работы ПО и взаимодействия с компонентами ПО.

Важным элементом современной СУ МР, во многом определяющим ее основные качественные показатели, является электропривод. Система управления электроприводом современного МР должна иметь цифровую реализацию. Без выполнения этого условия невозможно обеспечить высокие показатели динамики и точности движения. Эффективным средством решения задачи управления электроприводом является его функциональное и физическое разделение на две составляющие: **силовой модуль (СМ)** и программно реализованный алгоритм управления. Такое решение позволит наиболее просто и точно синхронизировать управление осями МР, получить доступ к переменным состояниям в реальном времени, динамически изменять структуру и параметры регуляторов.

При выполнении ряда технологических операций перед СУ МР могут возникать дополнительные задачи, связанные с необходимостью управления **периферийными устройствами**. К таким устройствам могут относиться различные датчики, измерители и средства очувствления, используемые при создании расширенных системных и управляющих программ. В число таких задач входят, например, обработка поверхностей с заданным усилием рабочего органа или его позиционирование согласно показаниям системы технического зрения.

Существующие в настоящее время подходы к созданию аппаратной базы СУ основываются на использовании двух основных классов устройств: промышленных компьютеров (ПК) и контроллеров движения (КД). [28, 29, 34]. Можно выделить следующие варианты (рис. 1.17).

При использовании ПК возможно создать легко переносимую систему, которая может быть реализована на широком классе совместимых устройств.



Рис. 1.17. Альтернативные архитектуры СУ МР

Основным недостатком такого подхода является необходимость создания всей СУ в рамках одного устройства, что требует использования операционной системы реального времени, в которой компоненты СУ будут работать в виде отдельных задач, синхронизируемых системными средствами. Такой подход не позволяет разделить управляющие и интерфейсные задачи, что увеличивает вероятность возникновения аппаратных или программных ошибок.

Главным преимуществом использования нескольких ПК является возможность разделения задач между ними. Первый ПК, на котором реализуется БУ, решает задачи управления «реального времени», а второй ПК реализует функ-

ции терминального устройства. Взаимодействие между компьютерами обеспечивается на базе различных промышленных протоколов.

Недостатком данного подхода является избыточность и дублирование отдельных компонентов. Такое решение оказывается неэффективным с точки зрения используемых ресурсов.

Два других подхода заключаются в использовании в качестве базовой архитектуры специализированного контроллера движения.

Использование одного КД требует реализации на нём, как управляющих, так и интерфейсных компонентов. Основной проблемой в данном случае является то, что создание полноценного пользовательского интерфейса требует значительной переработки разработчиком внутреннего ПО КД для получения требуемой функциональности. Кроме того, как и в случае с использованием одного ПК возникает необходимость реализации на одном устройстве нескольких компонентов СУ, что может привести к нестабильности его работы.

Для решения этих проблем КД может быть использован в сочетании с терминальным устройством, обеспечивающим управление его работой и интерфейс с пользователем. В качестве терминала может быть использовано любое устройство или система, предоставляющие необходимые возможности по созданию пользовательского интерфейса. Наиболее простым решением в данном случае будет использование ПК. В отличие от предыдущих подходов в данном случае не требуется использование специализированной ОС на ПК, т. к. процессы, выполняемые в режиме реального времени, реализуются в контроллере движения. При этом функции ПК и КД не дублируются, так как каждый из них выполняет отдельные задачи. Для взаимодействия между ними можно использовать промышленный интерфейс передачи данных типа EtherCAT, ModBus, PROFINET, Ethernet/IP. [38].

Из рассмотренных выше подходов к созданию современной СУ МР, соответствующей требованиям по производительности и функциональности, вариант с использованием КД в качестве блока управления и ПК для создания тер-

минального устройства позволяет наиболее эффективно организовать структуру СУ МР.

В структуре программного обеспечения (рис. 1.18) необходимо выделить два класса: ПО КД и ПО ТУ.

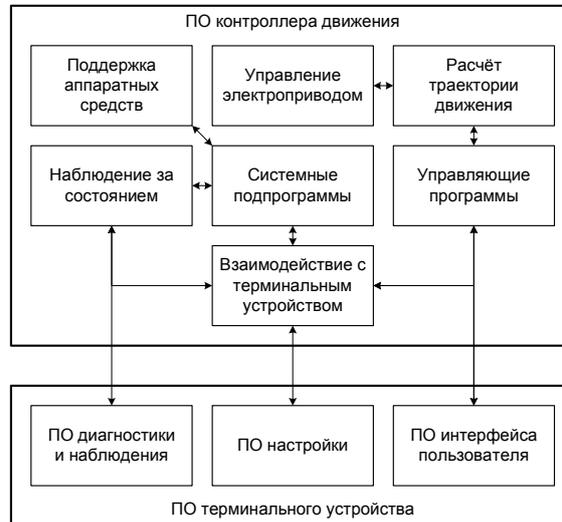


Рис. 1.18. Структура ПО КД

ПО КД включает в себя элементы, предназначенные для обеспечения работы БУ и взаимодействия с аппаратными средствами СУ МР. В его состав входят компоненты, обеспечивающие выполнение следующих задач:

1. Поддержка аппаратных средств;
2. Управление электроприводом;
3. Планирование и расчёт траектории движения;
4. Наблюдение за состоянием системы;
5. Выполнение системных программ;
6. Выполнение управляющих программ пользователя;
7. Взаимодействие с терминальным устройством.

Под **поддержкой аппаратных средств** понимаются компоненты, предназначенные для решения таких задач как опрос различных датчиков, организация работы интерфейсов передачи данных, опрос состояния МР и других эле-

ментов СУ. Также к данному компоненту ПО относится синхронизация процессов, выполняемых на КД.

Управление электроприводом включает опрос каналов обратной связи, алгоритмы координатных преобразований, расчет параметров регуляторов, формирование управляющих сигналов, коммутацию силовых ключей.

Алгоритмы управления двигателями реализуются непосредственно в КД. Помимо управления, они должны позволять получать информацию о переменных состоянии двигателей (ток, момент, скорость, положение, ошибка позиционирования). Они могут быть использованы для создания сложных алгоритмов управления и наблюдения за текущим состоянием МР.

В связи с тем, что на работу МР существенное влияние оказывают кинематические и динамические связи, для обеспечения требуемых характеристик может потребоваться создание адаптивной системы управления. Прежде всего, это относится к упругим системам, а также системам, в которых существенно влияние нелинейных элементов, таких как зазоры и сухое трение. Для управления ими требуется более сложные типы регуляторов [46].

В набор средств **планирования и расчёта траектории движения** входят такие компоненты, как планировщик траектории (ПТ), программы расчёта прямой и обратной задач кинематики, система обработки управляющих программ [56].

Задачей планировщика траектории является расчёт основных видов траекторий, используемых в работе МР: линейных, круговых, сплайновых. Для их реализации требуются соответствующие интерполяторы, взаимодействующие с программами расчёта кинематики МР.

Использование программ расчёта кинематики необходимо для перевода заданных движений из координатной системы, применяемой в управляющей программе в координатную систему, используемую в манипуляторе, и обратно. В связи с тем, что для многозвенных манипуляторов требуется проведение ряда

сложных пространственных преобразований, расчётные алгоритмы должны быть оптимизированы по быстродействию.

В средства **наблюдения за состоянием системы** входят такие компоненты, как сторожевой таймер, средства слежения за состоянием системных аварийных датчиков, уровнями физических величин и других средств, позволяющих определить работоспособность СУ и принять меры по предупреждению и устранению неисправностей.

Поддержание СУ МР в рабочем состоянии является задачей **системных программ**, выполняемых в КД. Они предназначены для обновления различных данных, наблюдения за характеристиками СУ и синхронизацией процессов в пользовательских программах.

Система обработки **управляющих программ** обеспечивает анализ переданной пользователем УП и перевод её в систему команд КД. Набор средств, используемых при написании УП, должен включать команды управления движением, преобразования координат между КС, взаимодействия с периферийным оборудованием.

Средства **взаимодействия с терминальным устройством** предназначены для обмена данными и управляющей информацией с пользователем. К ним относятся различные буферы для передачи информации, средства интерфейса с переменными состояниями системы. Прежде всего, следует определиться с основным интерфейсом ввода-вывода.

В связи с тем, что большинство проприетарных протоколов носят в той или иной степени закрытый характер, в качестве основного следует выбрать, построенный на открытом стандарте, такой как Ethernet [20, 21, 22] в промышленном исполнении (Profinet, EtherCAT, EtherNet/IP).

На основании изложенного, можно сделать вывод, что современная СУ МР должна быть построена на основании принципов модульности и открытости с использованием аппаратных решений, позволяющих реализовать режим реального времени, а также предоставлять набор управляющих алгоритмов, обеспе-

чивающих возможность управления манипулятором в сложных технологических задачах.

1.5. Выводы

Большинство используемых МР представляют собой антропоморфные манипуляторы, обладающие не менее чем 6 степенями свободы, работающие во вращательной системе координат. Наибольшее распространение МР получили в промышленности при выполнении операций, связанных с транспортировкой, упаковкой, сборкой и обработкой поверхностей.

Основным требованием, предъявляемым к промышленным манипуляторам, является точность позиционирования и перемещения по заданной траектории. В связи с этим при проектировании СУ МР следует учесть факторы, которые оказывают влияние на качество движения: 1) особенности кинематической схемы, 2) изменение динамических характеристик.

Для обеспечения быстрого и точного позиционирования и следования заданной траектории без рывков при перемещении целесообразно использовать S-образные профили скорости с заданием гладких производных как минимум до второго порядка.

В большинстве манипуляционных роботов используется электрический привод на базе двигателей постоянного тока и вентильных двигателей. Основными переменными состояниями, используемыми для управления МР, являются угловые координаты, скорости и токи нагрузки двигателей осей.

В связи с тем, что важным направлением развития МР является их интеграция в состав ГПС, необходимо предусмотреть возможность унификации архитектуры построения системы управления манипуляционным роботом и устройства числового программного управления.

В основу разработки СУ МР, отвечающей требованиям современного производства следует положить принципы модульности и открытой архитектуры.

Из рассмотренных выше подходов к созданию современной СУ МР, соответствующей требованиям производительности и функциональности, вариант с использованием КД в качестве блока управления и ПК для создания терминального устройства позволяет наиболее эффективно организовать структуру аппаратных и программных средств СУ МР.

Предложенная структура системного и прикладного ПО и подход к реализации системы приоритетов выполняемых задач являются базой для построения системы управления МР с широкими функционально-техническими возможностями, отвечающей высоким требованиям контурно-позиционного движения, предъявляемых современной промышленностью.

Глава 2. Разработка математической модели манипуляционного робота

2.1. Разработка кинематической схемы манипуляционного робота

2.1.1. Математическое описание кинематической схемы

На характеристики систем управления сложными мехатронными объектами, такими как манипуляционные роботы, существенное влияние оказывают их кинематические и динамические параметры. Вследствие этого необходимо дать их подробное математическое описание, удобное для использования при реализации СУ.

В решении указанной задачи можно выделить два взаимосвязанных направления. Первое заключается в создании точной кинематической модели манипулятора, позволяющей однозначно определить его пространственную конфигурацию, что в свою очередь даст возможность описывать законы перемещения рабочего органа. Вторым направлением является описание динамических характеристик и связей, существующих в манипуляторе, что позволит описать его поведение при перемещении по заданной траектории.

В данной работе исследования проводились с использованием манипуляционного робота Unimation PUMA-560 производства фирмы Nokia (рис. 2.1), получившего широкое распространение, как в промышленности, так и в научных исследованиях. Данный манипулятор был выбран в связи с тем, что его особенности и характеристики рассмотрены в ряде работ, что позволяет вести дальнейшие исследования без необходимости повторного решения базовых задач, таких как оценка его физических параметров.

В данной работе был принят ряд допущений, позволяющий упростить задачу исследования влияния компонентов манипулятора:

- 1) момент инерции звеньев манипулятора считается постоянным и равным моменту в положении звена, соответствующему нулевой координате.

2) не учитывается сухое и вязкое трение;

В целях сохранения логичности изложения материала, конкретные параметры манипулятора приведены ниже в виде таблиц в соответствующих разделах главы.



Рис. 2.1. Манипуляционный робот PUMA-560

Описание кинематической схемы манипулятора требует знания его габаритных размеров и параметров рабочего пространства.

Различные конфигурации МР [1] отличаются по своей структуре и характеристикам. Их можно классифицировать по типу используемых кинематических связей, как указано в главе 1. В промышленности наибольшее распространение получили многосвязные МР, обладающие поступательными и вращательными сочленениями (рис. 2.2). В качестве примера можно отметить манипуляторы таких фирм как АВВ, Fanuc, KUKA, Yaskawa, Kawasaki, наиболее широко распространённые на производстве.

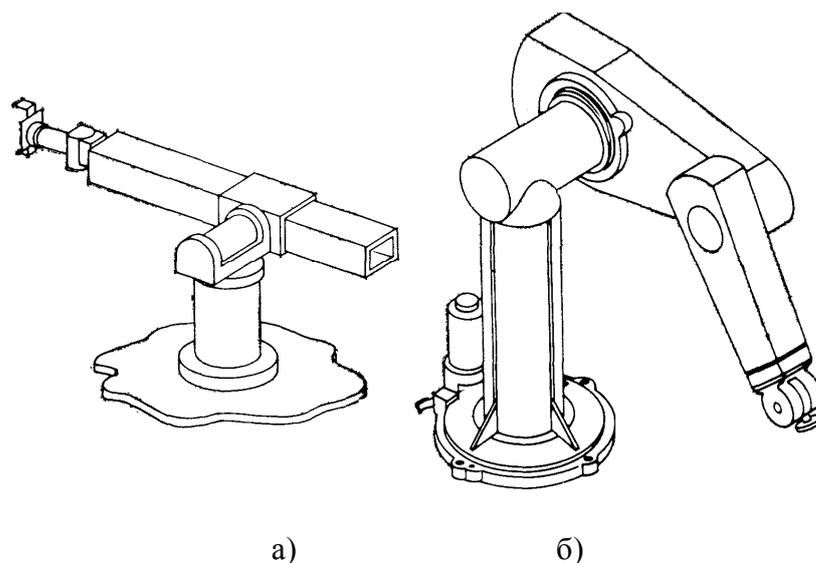


Рис. 2.2. Многозвенные манипуляционные роботы:
а) стэнфордский манипулятор,
б) манипуляционный робот PUMA-560

Из проведённого в главе 1 анализа следует, что манипуляторы используют различные координатные системы, каждая из которых обладает особенностями математического описания. Для того чтобы избежать неоднозначностей при разработке СУ следует определить систему координат для описания перемещений. В случае МР, используемого в производстве, наиболее рациональным вариантом является использование декартовой системы координат (для определения положения) и углов Эйлера (для указания ориентации манипулятора). Таким образом, основной задачей описания кинематических характеристик манипулятора является преобразование между его собственной и выбранной рабочей координатными системами.

Для планирования траектории движения манипулятора и определения его положения в пространстве необходимо решить два основных класса задач в виде прямой и обратной задач кинематики [54].

Решение прямой задачи служит для преобразования информации о положении манипулятора из собственной КС в рабочую (абсолютную), что требуется для определения координат рабочего органа манипулятора.

Решение обратной задачи предназначено для вычисления требуемой пространственной конфигурации манипулятора по положению рабочего органа, и является основной проблемой при планировании траектории его перемещения.

Решение указанных задач требует описания габаритных характеристик манипулятора в форме, удобной для их анализа и записи уравнений преобразования координат. Из существующих подходов основными являются выражение их в виде системы линейных или матричных уравнений [51, 52].

Для выполнения численных преобразований наиболее эффективным является метод однородных преобразований. Применительно к описанию манипуляционных роботов широкое распространение получило представление Дена-Хартенберга (ДХ-представление). Оно позволяет записать кинематику манипулятора некоторым набором матриц пространственных преобразований размерности 4×4 , выражающих относительное положение КС отдельных звеньев.

В этом случае кинематическая схема манипулятора описывается уравнением вида:

$$\mathbf{T} = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}\mathbf{A}_i, \quad (2.1)$$

где:

\mathbf{T} – матрица положения рабочего органа,

\mathbf{A}_i – матрицы преобразования i -сочленения,

n – количество сочленений в МР.

2.1.2. Уравнения прямой задачи кинематики

Решение прямой задачи кинематики требует преобразования множества координат, описывающих положение манипулятора в его собственной КС, в координаты рабочей КС.

$$(q_1, q_2, \dots, q_n) \rightarrow (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где:

q_1, q_2, \dots, q_n – координаты в собственной системе координат (присоединённые),

x_1, x_2, \dots, x_n – координаты в абсолютной системе координат (абсолютные).

При использовании шестизвенового манипулятора PUMA-560, работающего во вращательной системе координат, и применении ранее выбранной рабочей системы координат, воспользовавшись выражением (2.1), получим:

$$\mathbf{T} = {}^0\mathbf{A}_1 {}^1\mathbf{A}_2 {}^2\mathbf{A}_3 {}^3\mathbf{A}_4 {}^4\mathbf{A}_5 {}^5\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{s} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

где:

$\mathbf{n}, \mathbf{s}, \mathbf{a}$ – векторы 3×1 ориентации рабочего органа,

\mathbf{p} – вектор 3×1 положения рабочего органа в базовой системе координат.

Отдельные матрицы преобразования примут вид:

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^1\mathbf{A}_2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ {}^2\mathbf{A}_3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & -a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^3\mathbf{A}_4 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & (2.3) \\ {}^4\mathbf{A}_5 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^5\mathbf{A}_6 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где:

θ_i, d_i, a_i и α_i – параметры ДХ-представления (рис. 2.3):

θ_i – присоединённый угол, на который нужно повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью x_i ;

d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $(i-1)$ -й системы координат;

a_i – линейное смещение (кратчайшее расстояние между осями z_{i-1} и z_i);

α_i – угловое смещение – угол, на который нужно повернуть ось z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала сонаправлена с осью z_i .

Значения параметров d_i , a_i и α_i определяются ориентацией абсолютной системы координат и выбором точки отсчёта. Их определение и усреднённые численные выражения, полученные на основании анализа работ [48, 49], приведены в таблице 2.1.

Величины θ_i в данном случае соответствуют присоединённым координатам манипулятора и описывают положение манипулятора в собственной системе координат.

Таблица 2.1. Параметры ДХ-представления манипулятора PUMA-560

	θ_i	α_i	a_i , мм	d_i , мм	θ_{\min} , °	θ_{\max} , °
I	90	-90	0	0	-160	+160
II	0	0	431,8	149,09	-225	+45
III	90	90	-20,32	0	-45	+225
IV	0	-90	0	433,07	-110	+170
V	0	90	0	0	-100	+100
VI	0	0	0	56,25	-266	+266

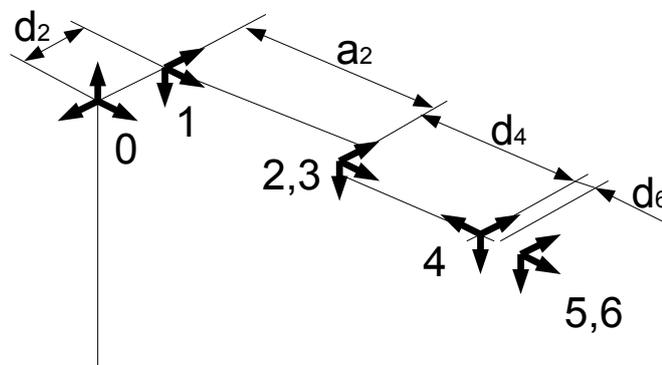


Рис. 2.3. Соотношение параметров ДХ-представления манипуляционного робота PUMA-560

Для расчёта координат манипулятора в условиях, когда матричные операции недопустимы или нерациональны с точки зрения использования вычислительных ресурсов, возможно описание прямой задачи кинематики в виде системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned}
 n_x &= C_1[C_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_{23}S_5C_6] - S_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6), \\
 n_y &= S_1[S_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) + C_{23}S_5C_6] + C_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6), \\
 n_z &= -S_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - C_{23}S_5C_6, \\
 s_x &= C_1[-C_{23}(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_{23}S_5S_6] - S_1(-S_4C_5S_6 + C_4C_6), \\
 s_y &= S_1[-C_{23}(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_{23}S_5S_6] + C_1(-S_4C_5S_6 + C_4C_6), \\
 s_z &= S_{23}(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + C_{23}S_5S_6, \\
 a_x &= C_1(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) - S_1S_4S_5, \\
 a_y &= S_1(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) + C_1S_4S_5, \\
 a_z &= -S_{23}C_4S_5 + C_{23}C_5, \\
 p_x &= C_1[d_6(C_{23}C_4C_5 + S_{23}C_5) + S_{23}d_4 + a_3C_{23} + a_2C_2] - S_1(d_6S_4S_5 + d_2), \\
 p_y &= S_1[d_6(C_{23}C_4C_5 + S_{23}C_5) + S_{23}d_4 + a_3C_{23} + a_2C_2] + C_1(d_6S_4S_5 + d_2), \\
 p_z &= d_6(C_{23}C_5 - S_{23}C_4S_5) + C_{23}d_4 - a_3S_{23} - a_2S_2,
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

где:

$$C_i = \cos \theta_i, \quad S_i = \sin \theta_i,$$

$$C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j), \quad S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j).$$

Такой подход может быть использован, в частности, при реализации СУ МР на микроконтроллере, не обладающем достаточными вычислительными возможностями для выполнения сложных математических преобразований.

2.1.3. Уравнения обратной задачи кинематики

В отличие от прямой задачи кинематики обратная имеет значительно больше подходов к своему решению, из которых основными являются методы обратных преобразований и бикватернионов [53, 55].

Рассмотрим основные черты каждого из методов.

Метод обратных преобразований заключается в определении значений отдельных присоединенных координат, основываясь на существующих матрицах

преобразований (2.3). В результате могут быть получены готовые аналитические выражения.

Решение задач кинематики посредством бикватернионов осуществляется путем представления кинематической конфигурации через двойные кватернионы и вычисления значений присоединенных координат посредством аппарата кватернионных преобразований. Данный метод позволяет в более компактной форме по сравнению с матрицами (2.3) описать кинематическую конфигурацию манипулятора, но требует реализации более сложных вычислительных алгоритмов по сравнению с методом обратных преобразований.

Исходя из необходимости реализации алгоритма решения обратной задачи кинематики в СУ МР, обладающей ограниченными вычислительными возможностями, необходимо выбрать подход с возможностью оптимизации вычислений.

Применение метода обратных преобразований с использованием выражений (2.3) или (2.4) позволяет получить выражения для координат МР в виде набора косинусов и синусов присоединённых координат.

Такое представление приводит к возникновению в ряде случаев множественности решений [1, 56]. Это происходит в связи с тем, что решение уравнений обратной кинематики в тригонометрических функциях может дать несколько равнозначных решений. Чтобы избежать этого, в расчётные выражения вводятся геометрические переменные, определяющие желаемую пространственную конфигурацию манипулятора:

$$\begin{aligned} ПУКА &= \text{sign}(-d_4 S_{23} - a_{23} C_{23} - a_2 C_2); \\ ЛОКОТЬ &= ПУКА \cdot \text{sign}(d_4 C_3 - a_3 S_3); \\ ЗАПЯСТЬЕ &= \begin{cases} \text{sign}(\mathbf{s} \cdot \mathbf{z}_4), \mathbf{s} \cdot \mathbf{z}_4 \neq 0, \\ \text{sign}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{z}_4), \mathbf{n} \cdot \mathbf{z}_4 = 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Таким образом, окончательные выражения для определения присоединённых координат МР PUMA-560 примут вид:

$$\theta_1 = \operatorname{arctg} \frac{-\text{ПУКА} p_y \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2} - p_x d_2}{-\text{ПУКА} p_x \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2} - p_y d_2},$$

$$R = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - d_2^2}, r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2},$$

$$\sin \alpha = -\frac{z}{R}, \cos \alpha = -\text{ПУКА} \frac{r}{R},$$

$$\cos \beta = \frac{a_2^2 + R^2 - (d_4^2 + a_3^2)}{2a_2 R}, \sin \beta = \sqrt{1 - \cos^2 \beta},$$

$$\theta_2 = \operatorname{arctg} \frac{\sin \alpha \cos \beta + \text{ПУКА} \cdot \text{ЛОКОТЬ} \cos \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \cos \beta + \text{ПУКА} \cdot \text{ЛОКОТЬ} \sin \alpha \sin \beta},$$

$$\cos \phi = \frac{a_2^2 + (d_4^2 + a_3^2) - R^2}{2a_2 \sqrt{d_4^2 + a_3^2}}, \sin \phi = \text{ПУКА} \cdot \text{ЛОКОТЬ} \sqrt{1 - \cos^2 \phi},$$

$$\sin \beta = \frac{d_4}{\sqrt{d_4^2 + a_3^2}}, \cos \beta = \frac{|a_3|}{\sqrt{d_4^2 + a_3^2}},$$

$$\theta_3 = \operatorname{arctg} \frac{\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta}{\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta},$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \vec{x}_3 & \vec{y}_3 & \vec{z}_3 & \vec{p}_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -S_1 & C_1 S_{23} & a_2 C_1 C_2 + a_3 C_1 C_{23} - d_2 S_1 \\ S_1 C_{23} & C_1 & S_1 S_{23} & a_2 S_1 C_2 + a_3 S_1 C_{23} + d_2 C_1 \\ -S_{23} & 0 & C_{23} & -a_2 S_2 - a_3 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\vec{z}_4 = \pm \frac{\vec{z}_3 \times \vec{a}}{\|\vec{z}_3 \times \vec{a}\|},$$

$$\Omega = \begin{cases} 0, z_4 = 0 \\ \vec{s} \cdot \vec{z}_4, \vec{s} \cdot \vec{z}_4 \neq 0, M = \text{ЗАПЯСТЬ} \operatorname{Esign} \Omega, \\ \vec{n} \cdot \vec{z}_4, \vec{s} \cdot z_4 = 0 \end{cases}$$

Если $z_4 \neq 0$:

$$\theta_4 = \operatorname{arctg} \frac{M(C_1 a_y - S_1 a_x)}{M(C_1 C_{23} a_x + S_1 C_{23} a_y - S_{23} a_z)},$$

Если ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ = 1: $\theta_4 = \theta_4 + 180^\circ$,

$$\theta_5 = \operatorname{arctg} \frac{(C_1 C_{23} C_4 - S_1 S_4) a_x + (S_1 C_{23} C_4 + C_1 S_4) a_y - C_4 S_{23} a_z}{C_1 S_{23} a_x + S_1 S_{23} a_y + C_{23} a_z},$$

$$\theta_6 = \operatorname{arctg} \frac{(-S_1 C_4 - C_1 C_{23} S_4) n_x + (C_1 C_4 - S_1 C_{23} S_4) n_y - S_4 S_{23} n_z}{(-S_1 C_4 - C_1 C_{23} S_4) s_x + (C_1 C_4 - S_1 C_{23} S_4) s_y - S_4 S_{23} s_z}.$$

Приведённые выражения позволяют точно определить требуемое положение звеньев манипулятора исходя из его желаемых абсолютных координат и пространственной конфигурации. Таким образом, они являются решением об-

ратной задачи кинематики и позволяют планировщику траектории сформировать задание для перемещения отдельных звеньев.

2.2. Разработка динамической модели

2.2.1. Определение динамической структуры манипулятора

При перемещениях манипулятора возникают изменения его пространственной конфигурации, что в свою очередь приводит к изменению сил, действующих на его отдельные элементы. Для учёта этих изменений требуется описать динамические характеристики МР и их связь с кинематической структурой манипулятора.

Задачу описания динамических характеристик МР можно разбить на следующие этапы:

- 1) определение моментов, действующих на отдельные звенья;
- 2) описание совокупности связей между отдельными звеньями;
- 3) представление динамических характеристик в удобной для дальнейшего анализа форме.

В процессе движения силы, действующие на манипуляционный робот, создают два основных вида моментов:

- 1) гравитационные моменты,
- 2) центробежные и кориолисовы моменты.

Гравитационные моменты определяются воздействием силы тяжести на звенья манипулятора. Они действуют независимо от скорости и являются выражением потенциальной энергии манипулятора.

Центробежные и кориолисовы моменты возникают при перемещении манипулятора в пространстве. Так как между отдельными звеньями существуют кинематические связи, силы, действующие на них, определяются не только их собственными скоростями, но и скоростями других звеньев.

Обобщённые моменты динамического взаимодействия возникают вследствие изменения положения звеньев при их ускоренном движении друг относительно друга.

Общее уравнение динамики манипулятора [57, 58, 59] может быть записано в виде:

$$\tau(t) = \mathbf{D}(\mathbf{q}(t))\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{h}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \mathbf{c}(\mathbf{q}(t)), \quad (2.7)$$

где:

$\tau(t)$ – вектор $n \times 1$ обобщенных моментов в сочленениях манипулятора,

$\mathbf{q}(t)$ – вектор $n \times 1$ присоединенных переменных манипулятора,

$\dot{\mathbf{q}}(t)$ – вектор $n \times 1$ обобщенных скоростей,

$\ddot{\mathbf{q}}(t)$ – вектор $n \times 1$ обобщенных ускорений,

\mathbf{D} – матрица $n \times n$ инерции (кинетической энергии) манипулятора,

\mathbf{h} – вектор $n \times 1$ кориолисовых и центробежных моментов,

\mathbf{c} – вектор $n \times 1$ гравитационных моментов,

n – количество сочленений в МР.

Гравитационные моменты определяются воздействием силы тяжести на отдельные звенья манипулятора. Они зависят от массы, положения и ориентации манипулятора в пространстве.

Каждый элемент вектора гравитационных моментов c_i может быть выражен как:

$$c_i = \sum_{j=1}^i F_{g,j} r_{i,j}, \quad (2.8)$$

где:

$F_{g,j}$ – сила тяжести, действующая на звено j ,

$r_{i,j}$ – вектор расстояния между центрами тяжести звеньев i и j .

Таким образом, для определения гравитационной составляющей момента необходимо описать кинематическую структуру манипулятора и определить положения центров тяжести отдельных звеньев.

Основываясь на значениях физических параметров манипулятора PUMA-560 (таблица 2.2) и используя схему манипулятора (рис. 2.2), можно провести расчеты элементов вектора \mathbf{c} .

Таблица 2.2. Массы и центры масс звеньев манипулятора PUMA-560

	m_i , кг	$r_{i,x}$, М	$r_{i,y}$, М	$r_{i,z}$, М
I	-	-	-	-
II	17,4	0,068	0,006	-0,016
III	4,8	0	-0,07	0,014
IV	0,82	0	0	-0,019
V	0,34	0	0	0
VI	0,09	0	0	0,032

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 C_2 + g_2 C_{23} + g_3 S_2 + g_4 C_{23} + g_5 (S_{23} C_5 + C_{23} C_4 S_5) \\ g_2 S_{23} + g_4 C_{23} + g_5 (S_{23} C_5 + C_{23} C_4 S_5) \\ -g_5 S_{23} S_4 S_5 \\ g_5 (C_{23} S_5 + S_{23} C_4 C_5) \\ 0 \end{bmatrix},$$

где:

g_i – гравитационный момент, действующий на i -звено.

$$g_1 = -g((m_3 + m_4 + m_5 + m_6)a_2 + m_2 r_{2,x}) = -37,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$g_2 = g(m_3 r_{3,y} - (m_4 + m_5 + m_6)d_4 - m_4 r_{4,z}) = -8,44 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$g_3 = gm_2 r_{2,y} = 1,02 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$g_4 = -g(m_4 + m_5 + m_6)a_3 = 0,249 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$g_5 = -gm_6 r_{6,z} = -0,0282 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$g_6 = 0.$$

Элементы вектора \mathbf{h} определяют суммарный момент, создаваемый кориолисовыми и центробежными силами, действующими на отдельное звено. Уравнение для их расчета можно записать следующим образом:

$$h_i = \mathbf{B}(q)[\dot{q}\dot{q}] + \mathbf{C}(q)[\dot{q}^2], \quad (2.9)$$

где:

$\mathbf{B}(q)$ – матрица $n \times n(n-1)/2$ кориолисовых моментов,

$\mathbf{C}(q)$ – матрица $n \times n$ центробежных моментов,

$$[\dot{q}\dot{q}] = [\dot{q}_1\dot{q}_2, \dot{q}_1\dot{q}_3 \dots \dot{q}_1\dot{q}_n, \dot{q}_2\dot{q}_3 \dots \dot{q}_2\dot{q}_n \dots \dot{q}_{n-1}\dot{q}_n],$$

$$[\dot{q}^2] = [\dot{q}_1^2, \dot{q}_2^2 \dots \dot{q}_n^2].$$

Коэффициенты матрицы \mathbf{B} определяют связь между кориолисовыми силами, действующими на звено, и обобщёнными скоростями отдельных звеньев.

Матрица \mathbf{C} выражает зависимость центробежных моментов от обобщённых моментов соответствующего звена.

Для расчета влияния этих сил на манипулятор, помимо данных о конфигурации манипулятора, необходимы значения мгновенных скоростей звеньев, которые в случае манипулятора PUMA-560 будут соответствовать угловым скоростям в сочленении.

Матрица \mathbf{D} описывает уравнение кинетической энергии манипулятора, позволяющее учесть изменение обобщённых скоростей перемещения, и является выражением собственных моментов инерции отдельных звеньев манипулятора. Она определяется на основании тензоров инерции звеньев манипулятора и матриц, определяющих их взаимное расположение.

Выражения для расчёта и коэффициенты описанных матриц приведены в Приложении 1.

2.2.2. Определение математического базиса

Сложность при создании динамической модели МР заключается в необходимости записи уравнений динамики движения манипулятора в форме, наиболее подходящей для ее дальнейшей реализации в СУ. Большинство существующих методов основывается на уравнениях Лагранжа, Ньютона-Эйлера, Д'Аламбера, Гаусса, Аппеля [60, 61]. Рассмотрим основные особенности каждого из них.

Метод Лагранжа позволяет создать точное аналитическое описание динамики МР в виде системы дифференциальных уравнений Лагранжа-Эйлера, которая может быть представлена в векторно-матричной форме после описания кинематики манипулятора в виде ДХ-представления.

Использование метода Лагранжа-Эйлера позволяет провести анализ факторов, оказывающих воздействие на поведение манипулятора, таких как взаимовлияние отдельных звеньев, изменение нагрузки, и определить силы, которые необходимо приложить к звеньям для осуществления заданного движения.

Непосредственная реализация уравнения (2.7) требует значительных вычислительных затрат. Так для 6-звенного МР требуется 102440 операций умножения и 78203 операции сложения. В связи с большим объемом вычислений, этот метод непригоден для реализации в системе управления, работающей в режиме реального времени. Поэтому в таких задачах необходимо использовать модифицированные методы [63, 64, 65, 66]. Они требуют упрощения структуры манипулятора, удаления ряда взаимосвязей, что ведет к некоторому снижению точности вычислений.

Существуют варианты реализации, позволяющие снизить вычислительные затраты заменой последовательных расчетов на рекурсивные, но они либо не позволяют решать обратную задачу динамики (Вотерс, Холлербах), либо не дают значительного выигрыша в оптимизации (Вукобратович, Потконьяк).

Метод Ньютона-Эйлера заключается в замене уравнений Лагранжа-Эйлера системой рекуррентных уравнений, что позволяет значительно сократить необходимые вычисления (для 6-звенного манипулятора требуется 792 операции умножения и 662 – сложения). Это даёт возможность использовать данный метод для расчетов динамики манипулятора в режиме реального времени. Недостатком этого метода является то, что с его помощью невозможно учесть влияние внутренних и внешних факторов (взаимовлияние звеньев, изменение гравитационных сил, нагрузки и т. П.) на манипулятор. Тем не менее, он может быть

использован для расчета динамики звеньев, для которых не требуется учет дополнительных воздействий.

Метод, основанный на использовании принципа Д'Аламбера, заключается в замене динамических сил, действующих на звенья манипулятора дополнительными силами инерции, выражающими их ускоренное движение относительно друг друга и в пространстве. Это делает его удобным для анализа влияния отдельных сил на манипулятор. При этом для реализации данного метода требуется меньше вычислительных затрат по сравнению с использованием уравнений Лагранжа-Эйлера. Однако, силы инерции рассматриваются как единое целое, что не позволяет оценить влияние их отдельных компонентов.

Использование уравнений Аппеля для неголономных систем позволяет записать уравнения динамики в виде дифференциальных уравнений в системе псевдокоординат. Данный метод предполагает, что силы, действующие на звенья манипулятора, являются идеальными. Это позволяет сделать предположения о влиянии внутренних сил взаимодействия, но не дает возможность учесть возможные внешние факторы.

Таким образом, для реализации динамической модели воспользуемся совокупностью уравнений Лагранжа и Ньютона-Эйлера. Такой подход позволит одновременно достаточно точно описать динамику манипулятора и минимизировать вычисления для звеньев, где влияние динамических характеристик не существенно. Вместе с тем отметим, что для эффективного решения задач динамики потребуется провести оптимизацию вычислений, с целью уменьшения количества вычислительных операций.

2.2.3. Оптимизация динамической модели

Для проведения оптимизации вычислений на основании указанного критерия следует определить необходимую точность расчетов, позволяющую одновременно добиться снижения вычислительных затрат и сохранить точность описания.

Оценка моментов, действующих на звенья манипулятора с учётом динамических параметров, приведённых в [48], показывает, что наибольшее влияние на конечный результат оказывают силы, действующие на первые три сочленения. Исходя из этого, основное внимание обратим на динамику первых трёх звеньев.

В качестве метода, используемого для описания динамики звеньев манипулятора, оказывающих наибольшее влияние на его поведение (звенья 1-3), была выбрана модификация метода Лагранжа-Эйлера, заключающаяся в удалении взаимосвязей, весовой коэффициент которых в конечном результате оказывается меньше, чем заданная расчетная точность.

Основной принцип данного подхода заключается в выделении наименее значимых слагаемых в элементах матриц **D**, **h** и **c** и замене их на нули.

Рассмотрим действие предложенного метода оптимизации на примере матрицы гравитационных моментов.

Исходная матрица имеет вид:

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 C_2 + g_2 C_{23} + g_3 S_2 + g_4 C_{23} + g_5 (S_{23} C_5 + C_{23} C_4 S_5) \\ g_2 S_{23} + g_4 C_{23} + g_5 (S_{23} C_5 + C_{23} C_4 S_5) \\ -g_5 S_{23} S_4 S_5 \\ g_5 (C_{23} S_5 + S_{23} C_4 C_5) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Далее для каждого ненулевого элемента матрицы следует определить наибольшее по модулю значение c_{\max} и долю каждого слагаемого в конечном результате c_w :

$$\begin{aligned}
\mathbf{c}_{\max} &= \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 \\ g_2 + g_4 + g_5 \\ g_5 \\ g_5 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 46,9372 \\ 8,7172 \\ 0,0282 \\ 0,0282 \\ 0 \end{bmatrix}, \\
\mathbf{c}_w &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7925 & 0,1798 & 0,0217 & 0,0053 & 0,0006 \\ 0 & 0,9682 & 0 & 0,0286 & 0,0032 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Исходя из (2.11), по весовым коэффициентам \mathbf{c}_w определим слагаемые, оказывающие наибольшее влияние на итоговый результат, в результате чего получим приближенные выражения для расчёта (2.10) с заданной точностью.

Так, при заданной погрешности вычислений 1% и 5% получаем следующие выражения для матрицы \mathbf{c} :

$$\mathbf{c}_{1\%} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 C_2 + g_2 C_{23} + g_3 S_2 \\ g_2 S_{23} + g_4 C_{23} \\ -g_5 S_{23} S_4 S_5 \\ g_5 (C_{23} S_5 + S_{23} C_4 C_5) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_{5\%} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 C_2 + g_3 S_2 \\ g_2 S_{23} \\ -g_5 S_{23} S_4 S_5 \\ g_5 (C_{23} S_5 + S_{23} C_4 C_5) \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{2.12}$$

Как видно из сравнения выражений (2.12) и (2.10) количество вычислительных операций сократилось с 21 операции умножения и 10 операций сложения до 12 операций умножения и 5 операций сложения в случае погрешности 1% и 10 операций умножения и 3 операции сложения в случае 5%, что позволяет уменьшить вычислительные затраты примерно вдвое.

Таким образом, используя выражение (2.12), можно рассчитать гравитационную составляющую обобщённого момента с заданной точностью, затратив минимум вычислительных ресурсов.

Используя предложенный метод для преобразования остальных матриц из выражения (2.7), получим итоговые выражения, которые могут быть использованы при создании динамической модели для СУ [Приложение 1].

Предложенный процесс оптимизации может производиться итерационно для достижения оптимального соотношения точности и затраченных вычислительных ресурсов (рис. 2.4).

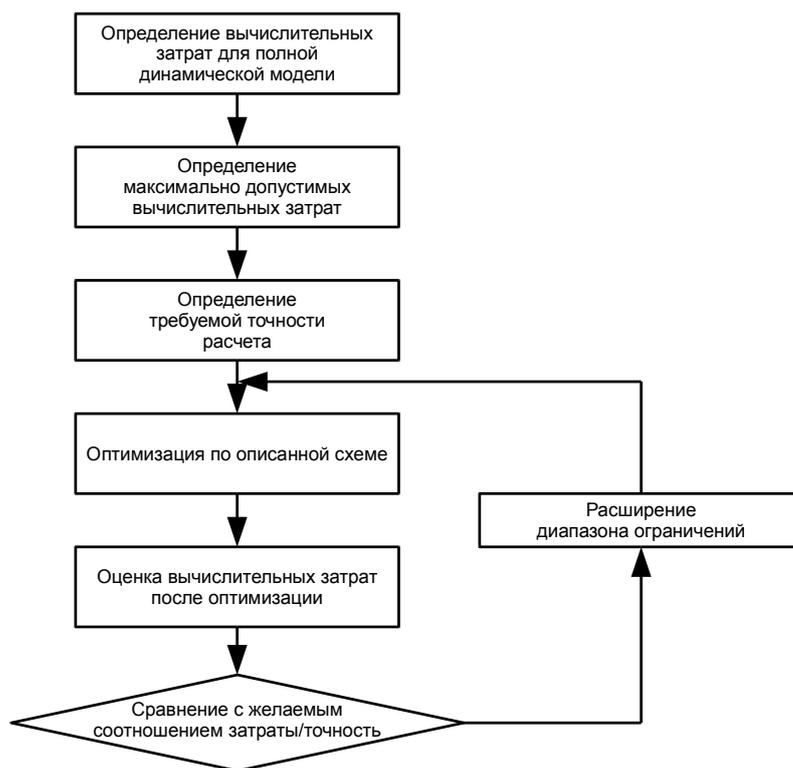


Рис. 2.4. Алгоритм оптимизации динамической модели

В виду подобия матриц, описывающих различные компоненты динамического уравнения, рассмотренный на примере гравитационной составляющей алгоритм оптимизации динамической модели может быть также применён к матрицам кинетической энергии, кориолисовых и центробежных сил.

Следует отметить, что основными факторами, влияющими на определение критериев оптимизации, являются технологические требования, предъявляемые к манипулятору и имеющиеся вычислительные ресурсы.

Проведённая оптимизация позволяет реализовать алгоритмы решения задач динамики с затратой минимального количества вычислительных ресурсов,

что дает возможность управлять движением манипулятора в режиме реального времени с учётом динамических параметров манипулятора.

2.3. Разработка и исследование обобщенной математической модели манипулятора

2.3.1. Обобщенная математическая модель

Разрабатываемая обобщенная математическая модель МР должна удовлетворять следующим условиям [64]:

1. Отображать кинематическую структуру манипулятора;
2. Описывать динамическую структуру;
3. Описывать связь механической и электрической частей манипулятора.

Исходя из указанных условий, целесообразно разделить модель (рис. 2.5) на три части: кинематическую, динамическую и электромеханическую.

В составе обобщенной модели кинематическая модель служит для преобразования координат рабочей КС в собственную КС манипулятора, что позволяет определить относительное положение звеньев манипулятора в заданной пространственной конфигурации. Другой задачей, решаемой этим блоком, является преобразование координат двигателей сочленений электромеханической части, соответствующих присоединённым координатам манипулятора, в абсолютную КС.

Динамическая модель предназначена для реализации и оценки динамических уравнений МР. Она представляет собой шесть блоков, соответствующих отдельным звеньям манипулятора. Учитывая необходимую точность вычислений, возможно использование как всех шести блоков, так и первых трёх.

В зависимости от выбранного подхода к описанию динамики манипулятора блоки могут быть реализованы в виде матричных или линейных выражений, позволяющих определить моменты сил, действующих на манипулятор.

Электромеханическая модель позволяет описать связь между механическими компонентами манипулятора и электрической системой, предназначенной для осуществления требуемых перемещений.

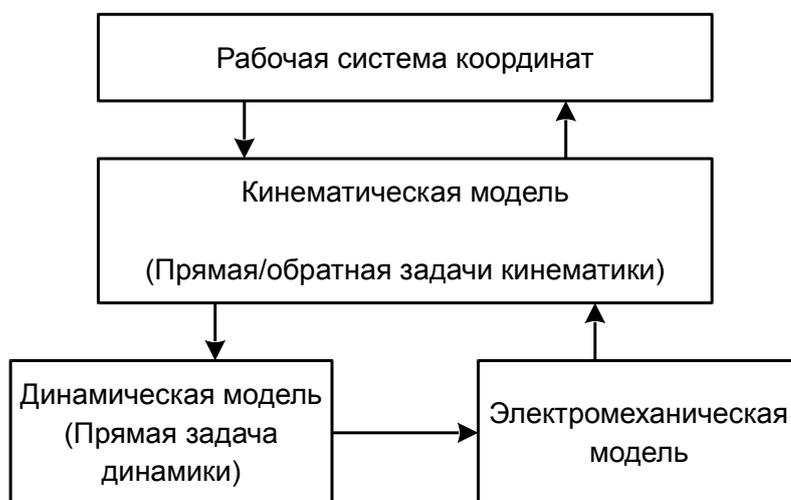


Рис. 2.5. Структурная схема обобщенной математической модели манипулятора PUMA-560

В состав **кинематической модели** МР (рис. 2.6) входят два основных блока, содержащие алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики.

Данная модель представляет собой элемент планировщика траектории, отвечающий за преобразование между заданными координатами движения и требуемыми координатами манипулятора.

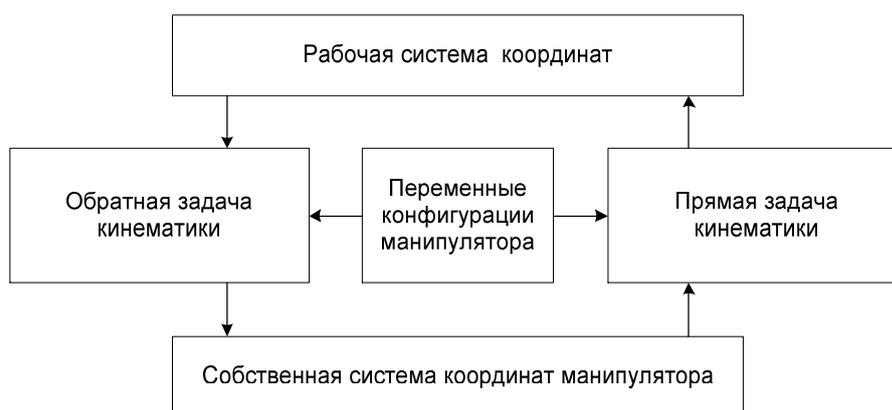


Рис. 2.6. Кинематическая модель манипулятора PUMA-560

Блок решения прямой задачи кинематики служит для преобразования присоединенных переменных манипулятора в рабочую (абсолютную) систему ко-

ординат. На его основе реализуется обратная связь между МР и планировщиком траектории. Его математическое описание представляет собой совокупность матричных уравнений (2.4), позволяющую определить координаты и ориентацию рабочего органа.

Блок решения обратной задачи кинематики преобразует координаты абсолютной системы координат в присоединенные переменные, которые могут быть использованы в качестве задания для управления звеньями МР. В качестве входных параметров блока, кроме координат, используются переменные пространственной конфигурации МР (РУКА, ЛОКОТЬ, ЗАПЯСТЬЕ), определяющие различные комбинации положения звеньев манипулятора в пространстве. Каждая переменная может принимать значения 1 или -1, соответствующие определенному положению манипулятора в пространстве (правая/левая рука, локоть сверху/снизу, запястье вверх/вниз).

Динамическая модель (рис. 2.7) содержит элементы, выполняющие расчёт моментов, действующих на звенья манипулятора, в соответствии с уравнением (2.7) или оптимизированными выражениями, такими как (2.12).

Данная модель позволяет вычислить моменты, действующие на отдельные звенья манипулятора. Полученные значения в дальнейшем используются как нагрузочные моменты для электромеханических компонентов манипулятора.

Так как расчёт динамических характеристик основан на методе Лагранжа-Эйлера, то он позволяет оценить влияние отдельных связей и звеньев. Кроме того, в модель могут быть введены дополнительные факторы, например, внешняя нагрузка.

Такое решение позволит в дальнейшем промоделировать влияние дополнительных внешних факторов на поведение манипулятора.



Рис. 2.7. Динамическая модель манипулятора PUMA-560

Электромеханическая модель представляет собой модель компонентов манипулятора, обеспечивающих преобразование заданного движения в реальное перемещение. Она включает в себя двигатели отдельных звеньев и механические передачи. Часть модели для одного звена приведена на рис. 2.8. Параметры двигателей указаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Параметры двигателей звеньев манипулятора PUMA-560 [68]

	$J_{\Sigma}=J_m+J_{нагр}$	$C_m=C_e$	i	L_m	R_m
I	$200 \cdot 10^{-6}$	0,253	62,61	0,001	1,6
II	$200 \cdot 10^{-6}$	0,253	107,36	0,001	1,6
III	$200 \cdot 10^{-6}$	0,253	53,69	0,001	1,6
IV	$33 \cdot 10^{-6}$	0,095	76,01	0,001	3,83
V	$33 \cdot 10^{-6}$	0,095	71,91	0,001	3,83
VI	$33 \cdot 10^{-6}$	0,095	76,63	0,001	3,83

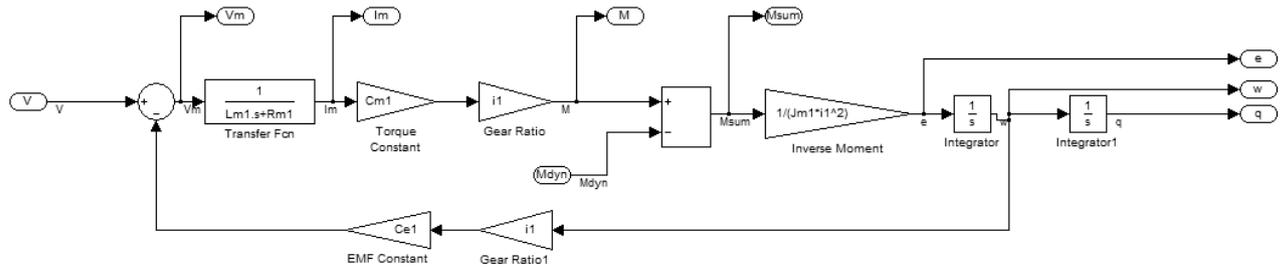


Рис. 2.8. Электромеханическая модель звена манипулятора PUMA-560

В дальнейшем электромеханическая модель позволит исследовать возможности управления манипулятором и влияние различных внешних факторов на работу манипулятора.

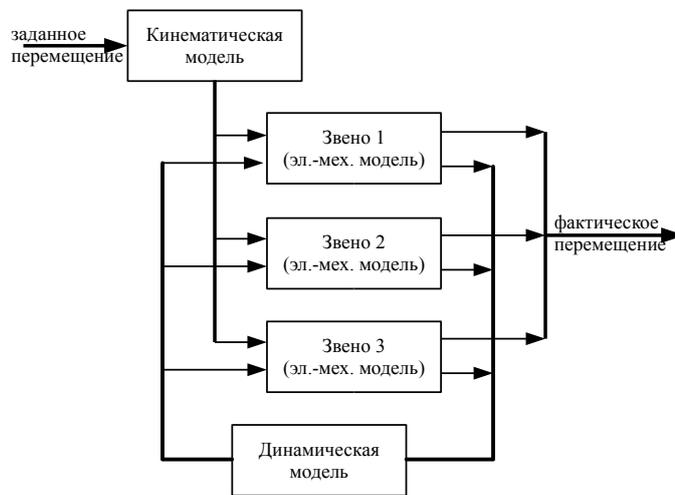


Рис. 2.9 Структурная схема обобщенной математической модели манипулятора PUMA-560

Объединив кинематическую, динамическую и электромеханическую модели, получим обобщенную математическую модель (рис. 2.9). Это позволит в рамках единого представления оценить различные процессы, протекающие при перемещении манипулятора, такие как изменение взаимного расположения звеньев, моментов нагрузки, действующих на них в результате проявления эффектов взаимовлияния и действия на манипулятор внешних сил. Как было указано ранее, суммарный момент инерции звена манипулятора принимается постоянным, а влияние изменения взаимного положения звеньев учитывается в динамической модели как величина момента, действующего на звено. При этом

перемещаемая нагрузка моделируется в виде дополнительного звена манипулятора.

В результате, можно сделать вывод, что представленная модель может быть использована при разработке и отладке СУ МР для создания алгоритмов управления МР, синтеза регуляторов для отдельных звеньев. При совместном использовании кинематической и динамической моделей возможно создание полнофункциональной модели МР с возможностью отладки компонентов СУ, отвечающих за выполнение перемещений.

2.3.2. Исследование обобщённой математической модели

Исследование обобщённой математической модели (рис. 2.9) состоит из 2 этапов:

1. Исследование кинематики манипулятора;
2. Исследование динамики звеньев манипулятора;

Исследование кинематики заключается в анализе правильности решения задач прямой и обратной кинематики и определения влияния переменных конфигурации на результат. Для этого был проведен расчёт перемещения манипулятора по траектории, изображённой на рис. 2.10, представляющей наклонный полуэллипс.

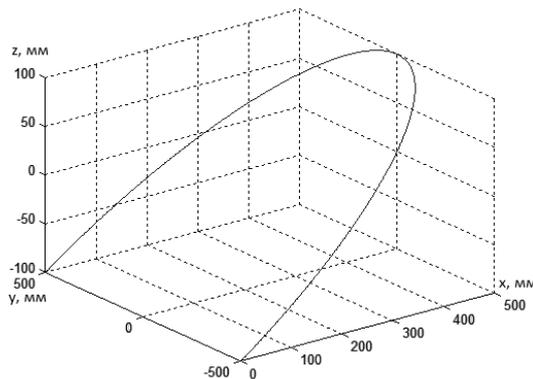


Рис. 2.10. Тестовая траектория

Результаты расчёта присоединённых переменных с использованием уравнений кинематики приведены на (рис. 2.11).

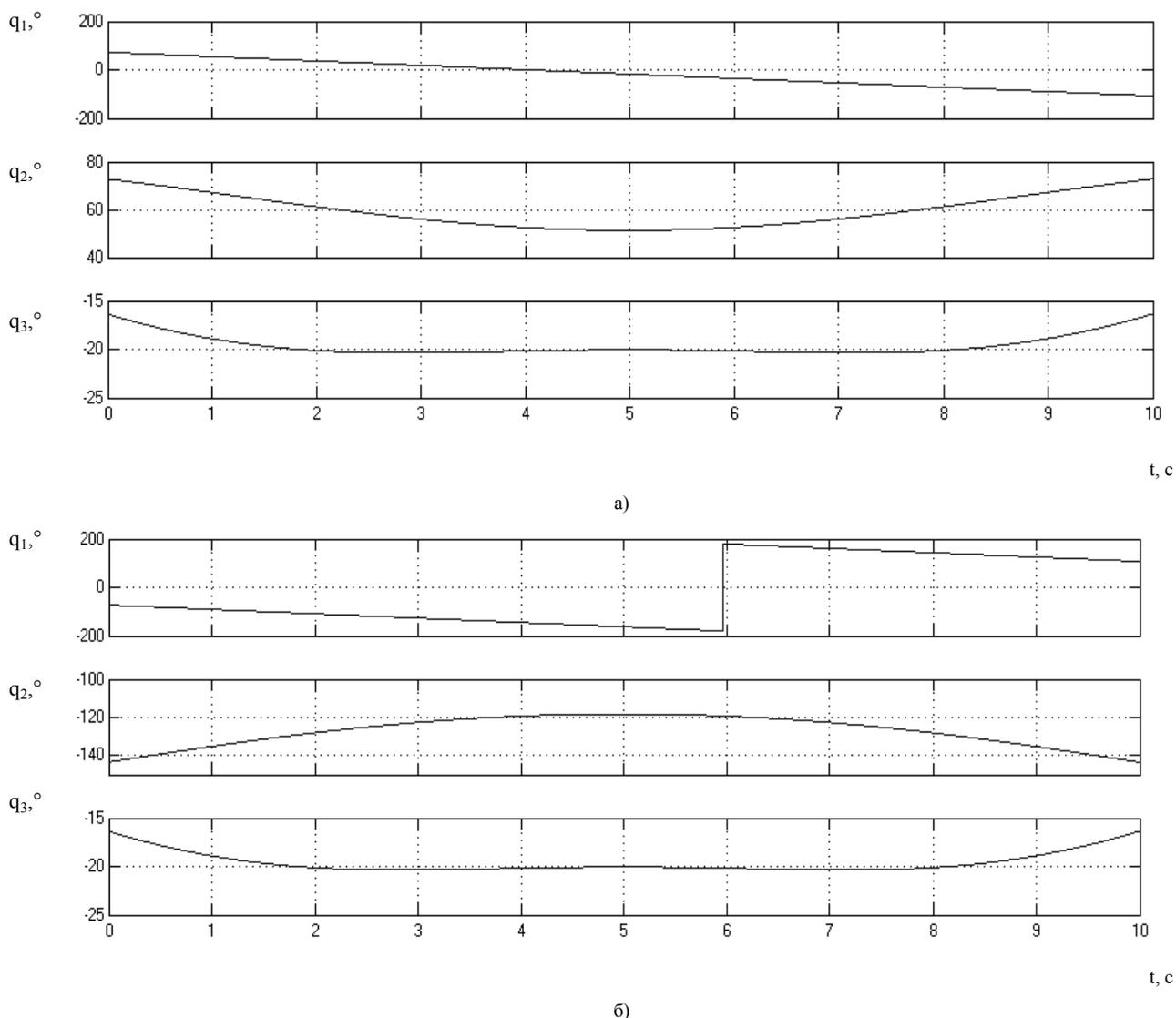


Рис. 2.11. Результаты моделирования кинематической модели:
 присоединенные переменные а) при переменных конфигурации, равных -1,
 б) при переменных конфигурации, равных 1

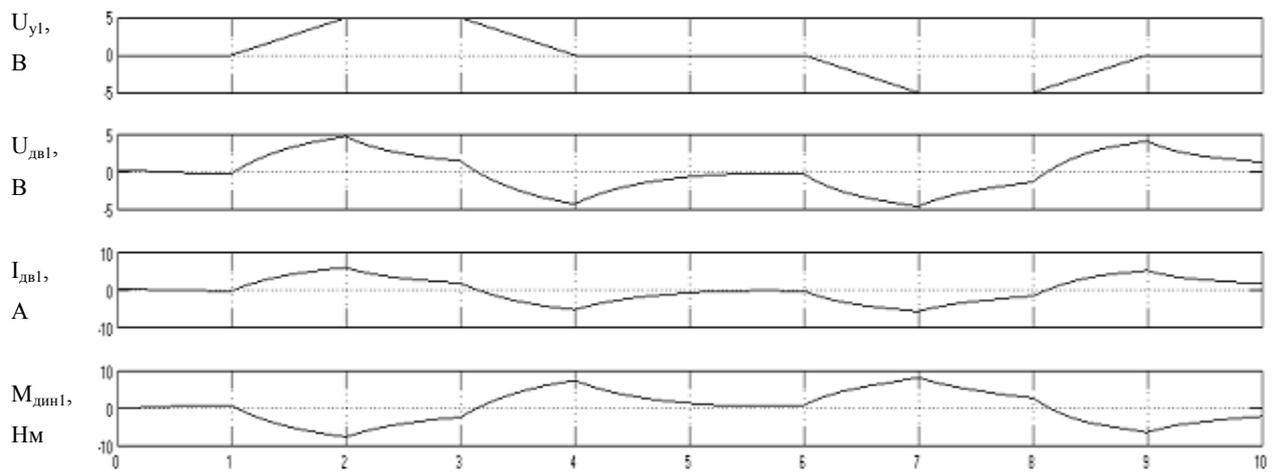
Как видно из результатов моделирования, переменные конфигурации оказывают значительное влияние на результат работы блока обратной кинематики. Если учитывать ограничения на допустимые координаты МР, то, перемещения звеньев, показанные на рис. 2.11, б, оказываются недопустимыми. Это объясняется тем, что, как видно из графиков, при перемещении происходит неверное разрешение сингулярности при перемещении первой оси и сами движения осуществляются за пределами ограничений на максимальные значения углов поворота ($\theta_{\min} \leq q \leq \theta_{\max}$), приведённых в таблице 2.1. Следовательно, переменные

конфигурации могут быть использованы для задания направления движения и предотвращения ошибочных перемещений МР в случае его работы в условиях ограничений перемещения.

Исследование динамической модели проводилось с целью оценки соответствия оптимизированной и полной моделей. Для этого в блоках динамической модели были реализованы алгоритмы полного расчета уравнений динамики и оптимизированного расчёта с показателем погрешности 1%. Кроме того, было проведено исследование переменных состояния, электромеханической модели, что позволило оценить работоспособность оптимизированной модели.

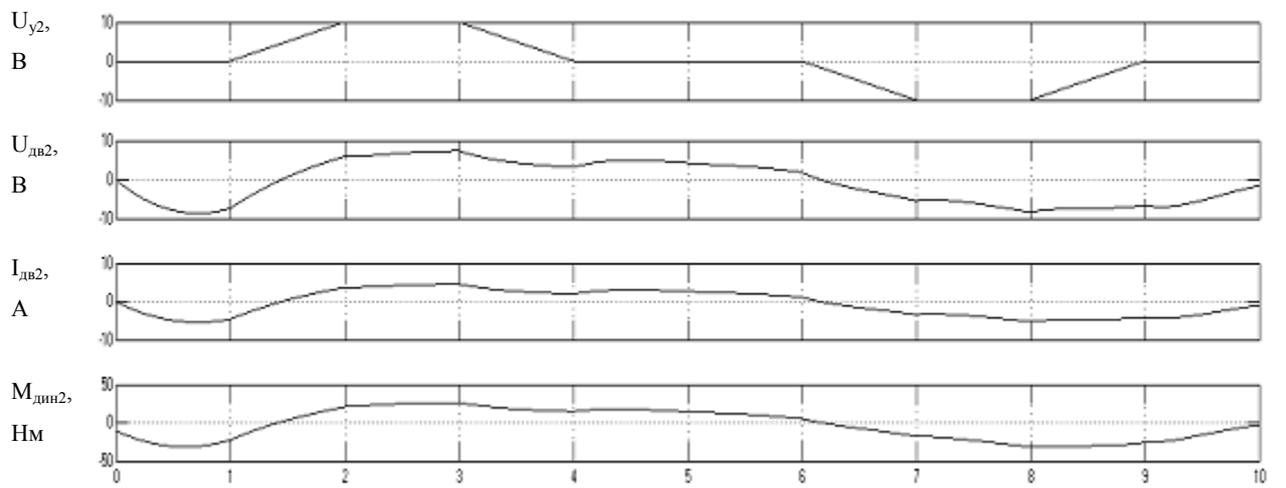
В связи с тем, что на данном этапе полная модель манипулятора не включает регуляторы, в качестве входного воздействия для электромеханической модели было выбрано симметричное входное воздействие по напряжению.

Результаты моделирования оптимизированной модели приведены на рис. 2.12. Заданное входное воздействие выбрано так, чтобы манипулятор, в котором отсутствуют связи между звеньями и внешние воздействия, совершал движение с разгоном и торможением первых трех осей с последующим возвратом в исходную точку. На рис. 2.12 изображены графики заданного входного воздействия $U_{y,i}$, напряжения $U_{дв,i}$, тока $I_{дв,i}$ и момента, возникающего за счет действия сил $M_{дин,i}$. На рис. 2.13 приведены графики координат q_i , скоростей ω_i и ускорений ε_i первых трех звеньев.



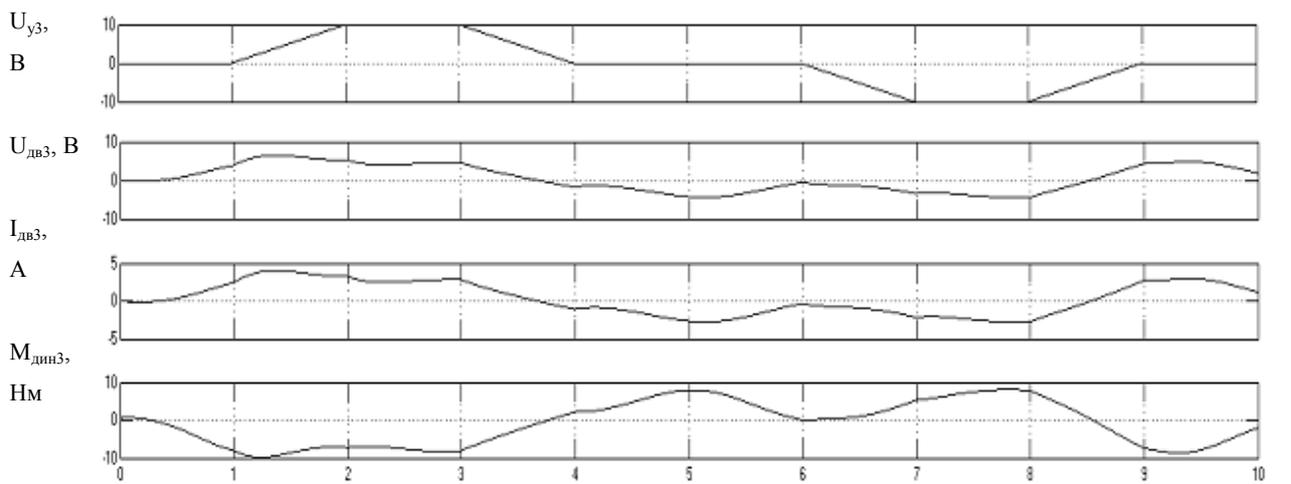
t, c

a)



t, c

б)



t, c

в)

Рис. 2.12. Результаты моделирования оптимизированной динамической модели (звенья 1,2,3) (электромеханические характеристики)

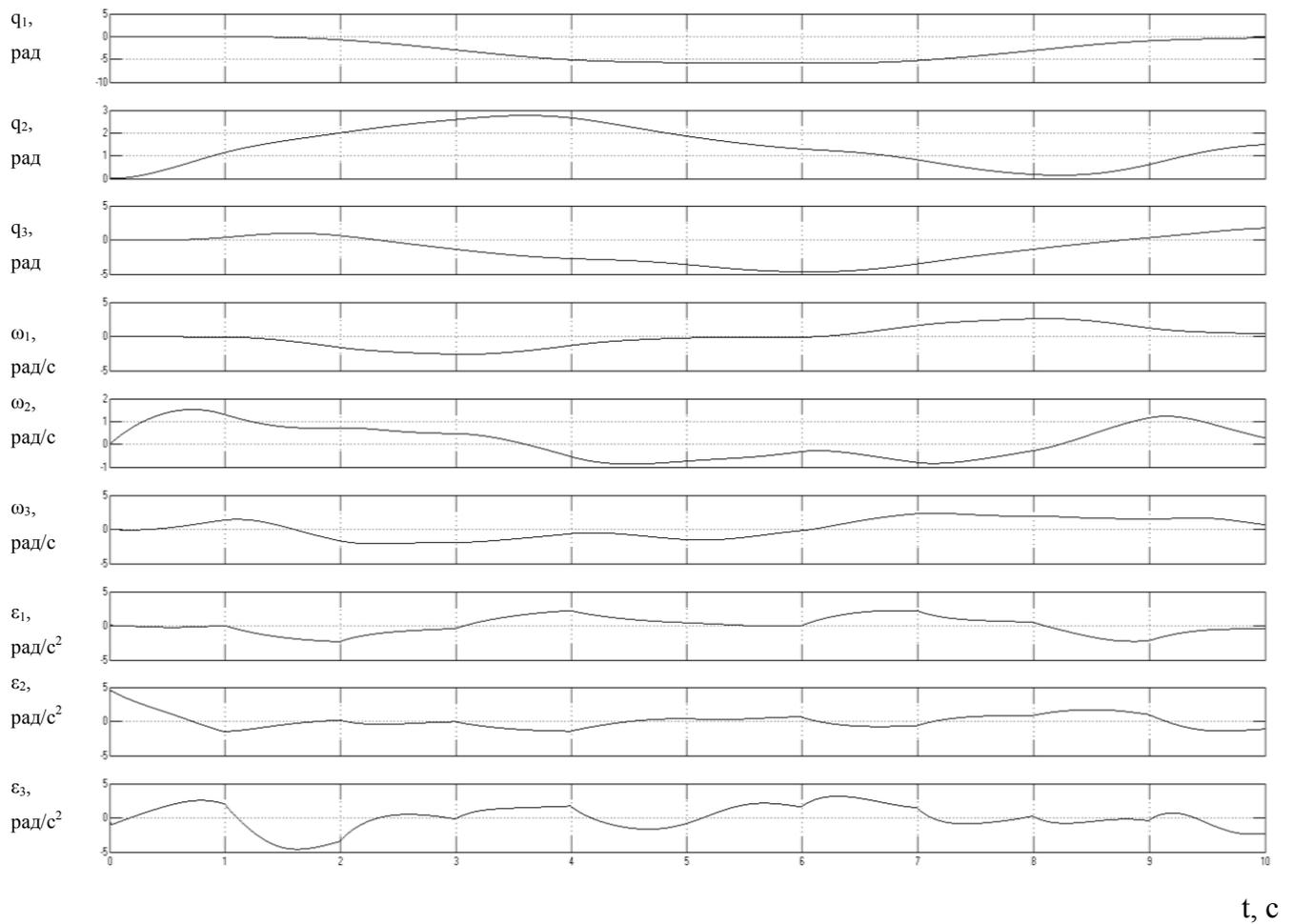


Рис. 2.13. Результаты моделирования оптимизированной динамической модели (звенья 1,2,3) (координаты, скорости, ускорения)

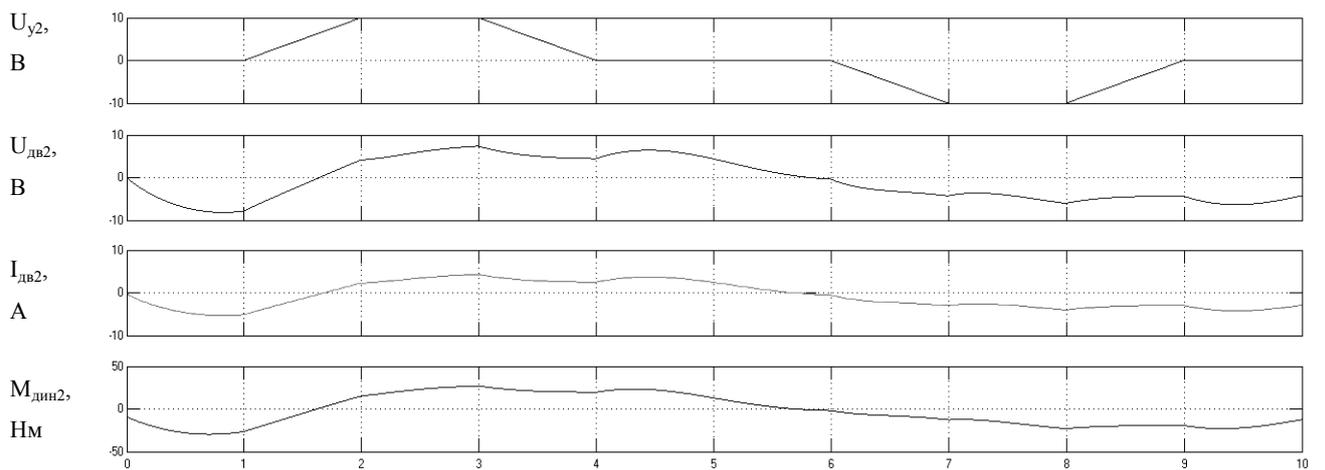


Рис. 2.14. Результаты моделирования полной динамической модели (звено 2)

Как видно из рис. 2.12, наибольший момент возникает при перемещении второго звена манипулятора. Логичным будет использовать именно данное зве-

но для сравнения с полной моделью. Результаты её моделирования приведены на рис. 2.14. Очевидно, что отличия незначительны, и предложенная модель достаточно точно описывает динамические процессы, происходящие в МР.

Важным результатом моделирования является возможность оценить перегрузки, возникающие в звеньях манипулятора в процессе движения. Так, из анализа приведенных результатов можно сделать вывод, что наибольшая нагрузка при выполнении перемещений возникает в звене 2. Таким образом, при планировании движения манипулятора и разработке СУ МР необходимо в первую очередь учитывать процессы в этом звене.

2.4. Выводы

1. Основной задачей описания кинематических характеристик манипулятора является преобразование между его собственной и выбранной рабочей координатными системами.

2. Описание кинематической структуры манипулятора в матричной форме, основанной на применении метода Денавита-Хартенберга, является наиболее удобным для выполнения пространственных преобразований, так как позволяет синтезировать кинематическую модель произвольного манипулятора путем задания взаимного положения звеньев.

3. Использование метода обратных преобразований для реализации алгоритма решения обратной задачи кинематики, позволяет получить готовые аналитические выражения в условиях, которые могут быть использованы для непосредственного расчёта координат.

4. Для реализации динамической модели предложено использовать совокупность уравнений Лагранжа и Ньютона-Эйлера, что позволяет достаточно точно описать динамику манипулятора и избежать лишних вычислительных затрат для звеньев, действие моментов на которые минимально.

5. Для описания динамики звеньев манипулятора, предложено использовать метод Лагранжа-Эйлера, заключающийся в удалении взаимосвязей, весо-

вой коэффициент которых в конечном результате оказывается меньше, чем заданная расчетная погрешность, что позволило привести динамические уравнения к виду, удобному для проведения вычислений в реальном времени, одновременно сохраняя информацию о значимых взаимосвязях между отдельными звеньями. Разработанный метод оптимизации динамической модели позволяет проводить численные расчеты с требуемой точностью при ограниченных вычислительных ресурсах.

6. На основании разработанной обобщенной математической модели, включающей кинематическую, динамическую и электромеханическую модели было описано поведение МР в процессе движения и определены основные факторы, действующие на отдельные звенья манипулятора в процессе перемещения. Данная математическая модель может быть использована при разработке и отладке СУ МР, для создания алгоритмов управления МР, синтеза регуляторов, исследования взаимовлияния звеньев.

Глава 3. Разработка и исследование системы управления

3.1. Разработка системы управления манипулятором

3.1.1. Особенности управления многоосевым манипулятором

Манипуляционный робот представляет собой сложную многомерную систему. Системы управления (СУ) манипуляционными роботами (МР) имеют ряд отличий от систем управления другими сложными производственными механизмами. Это связано с большим числом отдельно управляемых механических осей. В промышленности наиболее распространены МР, имеющие в своем составе шесть и более осей.

Следует отметить, что в связи с особенностями конструкции и расположения элементов МР, между осями существуют кинематические и динамические связи, которые необходимо учитывать, чтобы добиться требуемого качества процессов управления. Такие особенности кинематической схемы, свойственные большинству роботов, накладывают существенные ограничения на величину скоростей и ускорений в разных точках рабочего пространства. Кроме того, существуют рабочие зоны, в которых возникают ограничения перемещения рабочего инструмента. Указанные отличия определяют специфику построения системы управления (СУ) манипуляционного робота.

Для решения указанных проблем кроме получения динамической модели (ДМ) робота необходимо определить закон управления МР на основе этой модели, обеспечивающий требуемое качество.

Вопросы, связанные с расчетом динамической модели МР, подробно рассмотрены в [63-67]. Отметим, что изменение динамических характеристик (моменты сил взаимовлияния звеньев – гравитационных и кориолисовых) манипулятора можно свести к влиянию моментов сил, действующих на него, которые следует учитывать, как внешнее возмущение на вал соответствующего двигателя.

В работе предлагается подход к синтезу системы управления, основанный на анализе возможностей различных типов регуляторов и их сочетаний с целью получения простого, но достаточно эффективного закона управления роботом.

Предлагаемая система управления основана на принципах координированного управления звеньями манипулятора, работающего в системе присоединённых координат, с использованием динамической модели для компенсации сил, действующих на них. Основное преимущество данного подхода по сравнению с адаптивным управлением является снижение количества внешних переменных, требуемых для работы СУ и вычислительной сложности в связи с отсутствием дополнительных алгоритмов адаптации и пересчёта параметров.

Определим следующие требования к системе управления МР:

1. Возможность контурного и/или позиционного управления;
2. Управление моментом, формируемым на валу двигателя;
3. Наличие информации о положении, скорости и моменте каждого звена;
4. Минимизация ошибки положения и, в случае силомоментного управления, момента, создаваемого рабочим органом;
5. Расчет прямой и обратной задач кинематики на этапе формирования управляющего воздействия;
6. Учёт динамических характеристик манипулятора, выраженных в виде суммарного момента сил, действующих на вал каждого двигателя.

Приведённые требования позволяют разработать структуру СУ МР, обеспечивающую возможность как контурно-позиционного, так и силомоментного управления. В случае если управление моментом не требуется, компоненты, связанные с формированием момента, могут быть удалены без потери работоспособности СУ.

3.1.2. Структурная схема системы управления

На основании определенных ранее принципов управления была разработана общая структурная схема СУ МР (рис. 3.1).

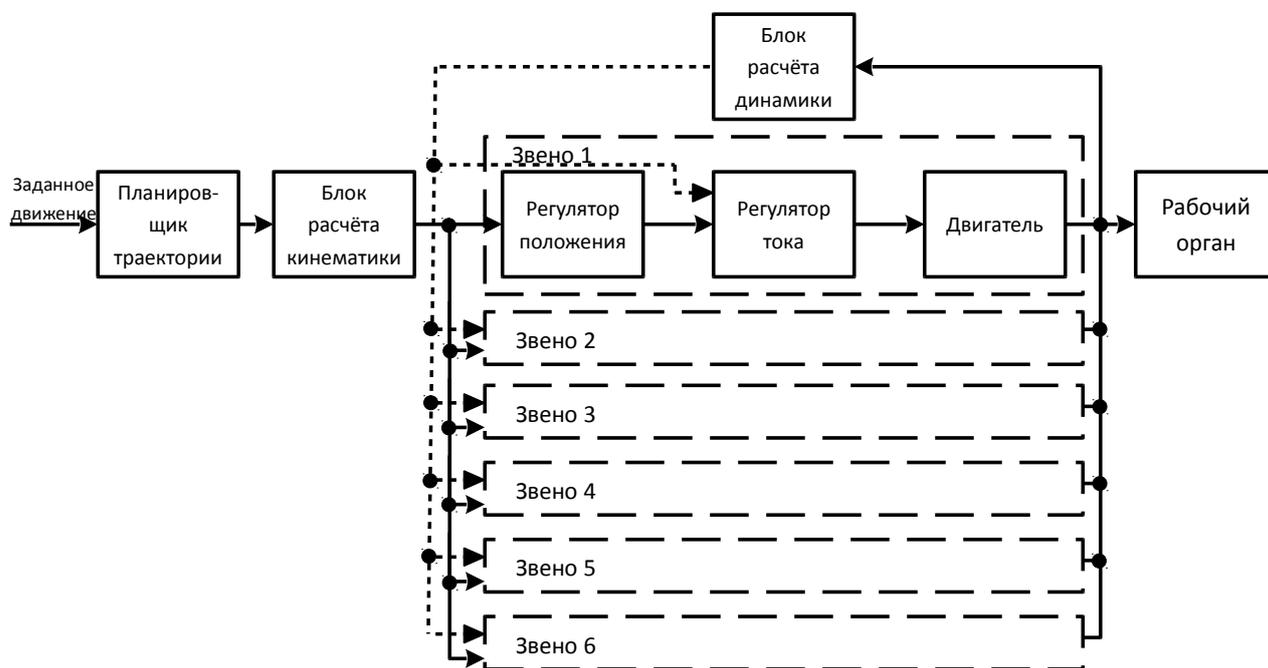


Рис. 3.1. Структурная схема СУ МР

Планировщик траектории предназначен для преобразования заданного извне движения в последовательность промежуточных точек, описывающих перемещение рабочего органа в пространстве. В зависимости от типа задания и вида перемещения он может формировать набор данных, включающий информацию о положении, скорости и ускорении каждого двигателя.

В связи с тем, что система координат планировщика может отличаться от системы координат манипулятора, для формирования управляющего воздействия необходимо преобразовать полученные данные в систему обобщенных координат. Для этого используется блок расчета кинематики, подробно рассмотренный в главе 2.

Для управления каждым из звеньев манипулятора требуются отдельные регуляторы положения и тока. При этом настройка их параметров должна вестись независимо, поскольку разные оси МР приводятся в движение различными

двигателями. В связи с этим возникает вопрос о координации управления различными осями.

Для учёта влияния динамических характеристик на поведение робота используется блок расчёта динамики, описанный в главе 2. Информация о переменных состояния рабочего органа в конкретный момент времени поступает на вход блока через каналы обратной связи. При этом она представлена в пространстве обобщённых координат и не требует преобразований. Рассчитанный момент, учитывающий влияние динамических характеристик, передаётся в регулятор тока в виде внешнего момента нагрузки.

Следует отметить, что конфигурация отдельных блоков, представленных на структурной схеме, определяется, прежде всего, кинематической структурой манипулятора и существующими связями между отдельными звеньями. В связи с тем, что в рамках данной работы используется манипулятор PUMA-560 с последовательной кинематической схемой, то предложенная структурная схема позволяет создать настраиваемую СУ, которая может быть использована для решения задач контурно-позиционного управления МР данного класса. Подробная структура отдельных компонентов рассматривается ниже.

3.1.3. Определение критериев качества системы управления

Основное внимание в рамках данной работы уделяется, прежде всего, вопросам контурно-позиционного управления, поэтому наиболее важным критерием качества управления является ошибка позиционирования рабочего органа [69, 70].

Следует выделить следующие виды ошибок:

1. Независимая ошибка положения звена;
2. Среднеквадратичная ошибка положения рабочего органа;
3. Относительная ошибка позиционирования рабочего органа манипулятора.

Рассмотрим каждый вариант подробно.

Независимая ошибка положения оси $\Delta q_i(t) = q_{i,z}(t) - q_i(t)$ представляет основной критерий качества управления отдельным звеном манипулятора. Она позволяет оценить, насколько точно происходит отработка задания на перемещение отдельной оси. Она может быть определена как при их независимом моделировании, так и при моделировании всей СУ. В связи с тем, что в реальном манипуляторе значительную роль играют внешние и внутренние динамические факторы, её влияние на общий результат оценить сложнее.

Среднеквадратичная ошибка $\Delta q_{cp}(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta q_i^2(t)}$ позволяет оценить суммарную ошибку позиционирования рабочего органа, т. Е. погрешность перемещения манипулятора в пространстве с учётом влияния всех внешних факторов. Она может быть рассчитана как сумма квадратов ошибок положения осей. В связи с тем, что МР рассматривается как единая система, данный критерий позволяет достаточно точно оценить точность позиционирования манипулятора.

Относительная ошибка $\Delta q_{i,o}(t) = \frac{\Delta q(t)}{x(t)}$ показывает качество перемещения манипулятора при изменении его положения. Она позволяет оценить точность позиционирования в зависимости от пределов перемещения или скорости.

Помимо указанных критериев значительную роль играют такие характеристики, как время переходного процесса и перерегулирование. Они позволяют оценить качество отработки заданного управляющего воздействия и определить предельно допустимые физические характеристики перемещения, такие как ускорение и скорость.

Таким образом, ключевым показателем качества управления многоосевым манипуляционным роботом является среднеквадратичная ошибка позиционирования, которая показывает, насколько точно выполняется задаваемое перемещение, время переходного процесса и перерегулирование, дающие возможность оценить переходные процессы.

3.2. Синтез контура положения

3.2.1. Разработка регулятора

Основываясь на описанной структурной схеме СУ МР, можно определить подходы к синтезу системы управления [71, 72, 73, 74, 75].

Следует отметить, что наибольшее влияние на поведение СУ оказывают три первых звена манипулятора. Таким образом, для дальнейшего моделирования и оценки целесообразно вести анализ по ним.

При синтезе регулятора выберем следующую стратегию. В первом случае будем ориентироваться на достаточно простой в реализации и эффективный в настройке пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор с введением упреждающих связей для повышения качества управления в динамических режимах при управлении электромеханической системой с жесткими связями в звеньях. В другом случае выберем регулятор состояния в его полиномиальном варианте как более «жесткий», робастный регулятор, малочувствительный к действию возмущений, однако более сложный в реализации и затратный с точки зрения требований к вычислительным ресурсам, но позволяющий при необходимости учитывать упругие свойства звеньев манипулятора.

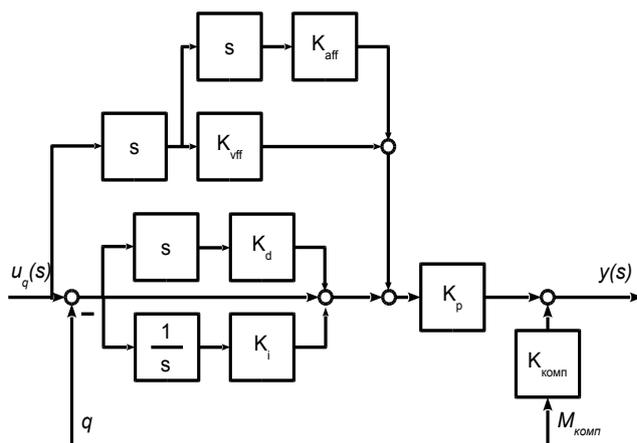


Рис. 3.2. Модель ПИД-регулятора с упреждающими связями

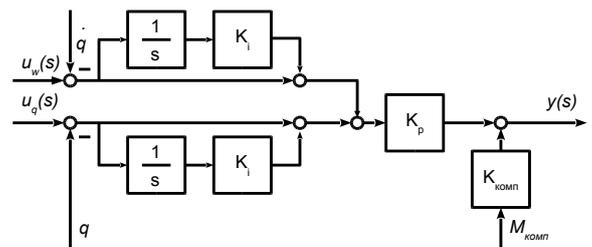


Рис. 3.3. Модель регулятора с отдельным контуром скорости

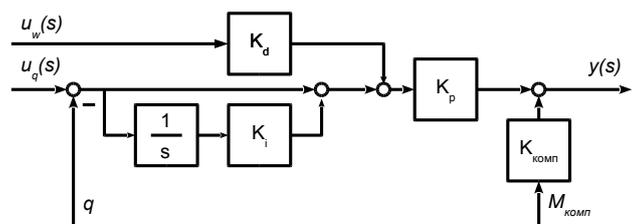


Рис. 3.4. Модель регулятора с двумя входами

Кроме того, определим необходимость и степень точности расчета динамической модели для указанных регуляторов и ее влияние на качественные показатели работы СУ.

Цель исследований – определить области и условия использования рассматриваемых вариантов с учетом требований к вычислительным ресурсам.

В связи с тем, что большинство технологических задач основывается на использовании контурно-позиционного управления, от СУ требуется минимизация динамической и статической ошибок позиционирования. Для решения этой задачи в рамках использования ПИД-регулятора возможно использование нескольких подходов [73, 74]:

1. Введение упреждающих связей по производным задания на положение (скорость, ускорение) (рис. 3.2);
2. Введение отдельного контура для управления скоростью (рис. 3.3).

Первый метод позволяет, сохранив общую структуру регулятора, расширить его дополнительными связями, которые эффективно снижают значение динамических ошибок по введенным производным. В этом случае достигается баланс минимизации динамических и статических ошибок, позволяющий применять его как для позиционных перемещений, так и для контурного управления. Однако введение упреждающих связей приводит к появлению дополнительных звеньев дифференцирования, что сопровождается ростом вычислительных затрат.

Второй метод заключается в фактическом разделении исходного ПИД-регулятора на ПИ-регулятор положения и П-регулятор скорости. Такой подход позволяет независимо минимизировать не только ошибку по положению, но и ошибку по скорости. При этом расчётная сложность алгоритма остается на исходном уровне. К недостаткам такого подхода следует отнести необходимость введения датчика скорости, что приведёт к усложнению СУ, либо звена диффе-

ренцирования в обратной связи по положению, что вызовет запаздывание на один такт.

Предлагаемый вариант реализации использует комбинацию описанных методов (рис. 3.4). Прежде всего, ПИД-регулятор положения заменяется ПИ-регулятором с введением упреждающей связи по скорости. При этом задания на положение и скорость формируются в планировщике траектории, что позволяет исключить их расчет из такта «реального» времени.

Другим важным шагом во всех рассмотренных случаях является введение в регулятор компенсирующей связи по моменту $M_{\text{компл}}$, которая позволяет учесть влияния гравитационных, кориолисовых и центробежных сил. Введение такой связи позволяет отказаться от компенсирующей связи по ускорению, поскольку ее влияние будет учитываться при изменении момента, что также снижает вычислительную нагрузку.

В результате синтезированный регулятор позволяет не только минимизировать ошибку позиционирования рабочего органа, но и контролировать такие характеристики движения, как скорость и ускорение. Это является важным фактором при реализации контурно-позиционного управления и даёт возможность использовать данный подход для более широкого круга задач.

Настройка параметров регулятора может основываться на ряде различных методик. Предлагаемая методика, опирается на подход, заключающийся в настройке коэффициентов регулятора с использованием задающих воздействий, определяемых режимом работы. Она позволяет вести настройку регулятора исходя из общих требований к качеству управления без необходимости знания точных параметров объекта управления.

Различные типы входного задания позволяют настроить оптимальные параметры для режимов работы, которым они соответствуют. Так настройка с использованием [76, 77]:

- 1) ступенчатого воздействия позволяет промоделировать режим позиционного управления, для которого требуется минимизация статической ошибки (настраивается K_p и K_d);
- 2) линейное задающее воздействие – контурного перемещения с постоянной скоростью (настраивается K_i и подстраивается K_d);
- 3) синусоидальное – для движения с переменной скоростью (настраивается $K_{\text{комп}}$).

Исходя из назначения конкретного манипулятора, для настройки может использоваться как какое-либо одно задающее воздействие, позволяющее достичь необходимого качества управления при заданном режиме работы, так и их комбинации. Во втором случае необходимо определить набор параметров, позволяющий добиться желаемого качества управления при всех типах задающих воздействий.

В результате настройки для первых трёх звеньев при контурном управлении были получены следующие значения коэффициентов регуляторов:

$$K_p = 73,25; K_i = 0,05; K_d = 0,37; K_{\text{комп}} = 0,015.$$

Несмотря на то, что использование ПИД-регулятора является наиболее распространённым в настоящее время вариантом построения СУ, существует ряд других решений, позволяющих добиться повышения качества управления. В частности, в современных СУ широко используются принципы модального управления [71].

В ряде применений МР (в частности в случае манипуляторов высокой грузоподъёмности) проявляются эффекты, связанные с существенным изменением параметров ОУ, а также может понадобиться введение в модель манипулятора упругих элементов. В данном случае рациональным становится использование методов теории модального управления, которая позволяет задать динамические свойства системы управления на этапе проектирования. Синтез регулятора в данном случае требует знания характеристик объекта управления, определяе-

мых либо экспериментально на этапе моделирования, либо использования ме-

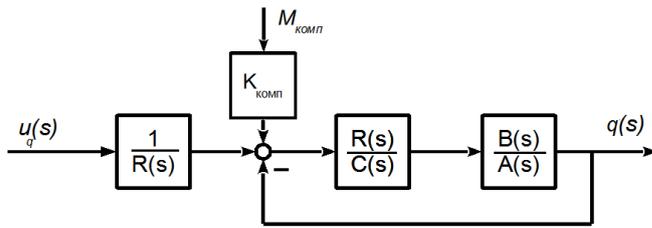


Рис. 3.5. Структура СУ с полиномиальным регулятором

тодов идентификации.

Основываясь на известных параметрах манипулятора, можно синтезировать полиномиальный регулятор (ПР) (рис. 3.5) применительно к разрабатываемой СУ [80, 81]. Выбор

ПР обусловлен тем, что для его реализации требуется обратная связь только по угловому положению отдельного звена. При этом следует отметить, что, поскольку использование ПР позволяет получить более робастную систему по сравнению с ПИД-регулятором, точность расчёта динамической модели может быть снижена без потери качества управления.

Вариант настройки полиномиального регулятора рассмотрим на примере манипулятора, перемещающего груз массой 15 кг, равной номинальному значению грузоподъёмности МР. Это позволит оценить качество СУ в «жестких» условиях работы. В этом случае помимо внутренних динамических моментов на звенья манипулятора будет действовать момент нагрузки. При этом можно выделить постоянную и переменную составляющие момента, формируемого нагрузкой. Постоянная составляющая определяется силой тяжести, действующей на нагрузку, а переменная — силами, возникающими при её перемещении. Тогда влияние груза в модели отражается путём введения момента инерции нагрузки в электромеханическую модель звена манипулятора (постоянная составляющая) и добавлением дополнительного звена в динамическую модель манипулятора (переменная составляющая) (рис. 2.7).

В случае перемещения груза массой 15 кг суммарный момент инерции, приведённый к валу двигателя (на примере звена 2) в положении, соответствующем координате звена $q_2=0$, будет составлять:

$$J = J_{дв} + J_{нагр} \approx 20 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

В этом случае передаточная функция звена манипулятора имеет вид:

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{1,26 \cdot 10^5}{s^3 + 1600s^2 + 3,2 \cdot 10^4s}$$

Поскольку постоянная времени двигателя представляет собой достаточно малую величину, то без потери точности можно пренебречь ею. В этом случае передаточная функция сведётся к виду:

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{79}{s^2 + 20s}$$

Учитывая, что в состав ПИД-регулятора введена интегральная составляющая, обеспечивающая нулевую статическую ошибку, для корректного сравнения регуляторов в ПР также введено интегральное звено для обеспечения астатизма по углу.

Рассмотрим два варианта реализации ПР:

1. с увеличением порядка полинома знаменателя ПФ объекта управления $A(s)$;
2. с увеличением порядка полинома знаменателя ПФ регулятора $R(s)$.

В первом случае передаточная функция объекта управления примет вид:

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{79}{s^2 + 20s} \cdot \frac{1}{s}$$

Откуда следует уравнение синтеза:

$$(s^2 + 20s)sC(s) + 3,95R(s) = D(s).$$

В данном случае примем

$$\deg C(s) = \deg R(s) = n-1 = 2,$$

$$\text{где } n = \deg A(s) = 3.$$

Откуда следует,

$$\deg D(s) = \deg A(s) + \deg C(s) = 5.$$

Для формирования в СУ апериодических переходных процессов при определении полюсов желаемого характеристического полинома выберем распределение Ньютона 5-го порядка со среднеквадратичным корнем $\Omega_0=40 \text{ с}^{-1}$, вы-

бранным так, чтобы быстродействие полиномиального регулятора было сопоставимо с ПИД-регулятором для упрощения процесса сравнения интегральных показателей качества:

$$D(s) = s^5 + 200s^4 + 16000s^3 + 64000s^2 + 1280000s + 102400000.$$

Решая уравнение синтеза с использованием выбранных параметров, получаем полиномы $R(s)$ и $C(s)$:

$$R(s) = 4,9 \cdot 10^3 s^2 + 1,62 \cdot 10^5 s + 1,3 \cdot 10^6,$$

$$C(s) = s^2 + 180s + 12400.$$

В данном случае порядок регулятора с учётом дополнительного интегратора становится равен трём.

Другим вариантом повышения статической точности является увеличение порядка полинома знаменателя.

Объект управления и уравнение синтеза имеют те же параметры, что и в случае системы управления без астатизма, но порядки полиномов будут определяться следующим образом:

$$\deg C(s) = \deg R(s) = n = 2,$$

$$\text{где } n = \deg A(s) = 2.$$

Порядок желаемого полинома определяется из уравнения:

$$\deg D(s) = \deg A(s) + \deg C(s) = 4.$$

В данном случае желаемый характеристический полином выберем с использованием распределения Ньютона 4-го порядка со среднеквадратичным корнем $\Omega_0 = 40 \text{ с}^{-1}$:

$$D(s) = s^4 + 160s^3 + 9600s^2 + 256000s + 2560000.$$

Решая уравнение синтеза, получим полиномы $R(s)$ и $C(s)$:

$$R(s) = 86s^2 + 3240s + 32400,$$

$$C(s) = s^2 + 140s.$$

Данный подход позволяет снизить на единицу порядок регулятора и значительно уменьшить величину его коэффициентов.

Как видно из результатов расчётов, введение астатизма увеличивает порядок системы управления, что приводит к росту вычислительных затрат. Оптимальной является реализация ПР с увеличением степени полинома $R(s)$. Настройка СУ с полиномиальным регулятором для объекта управления может быть выполнена с использованием методики, описанной в [82].

3.2.2. Оценка характеристик системы управления

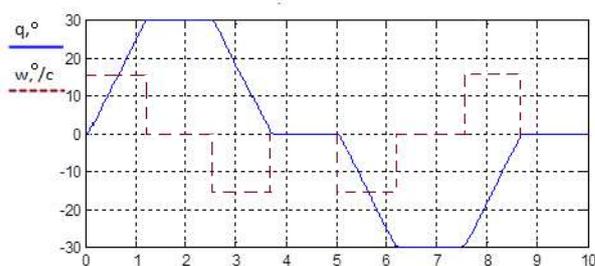


Рис. 3.6. Задающее воздействие со ступенчатыми изменениями производных

Для исследования предложенных вариантов реализации СУ было проведено моделирование работы первых трех звеньев МР с использованием программного комплекса MatLab. Исследование проводилось для двух типов задающих воздействий.

Первое (рис. 3.6) формирует такую траекторию движения рабочего органа, при которой возникают разрывы в сигналах производных перемещения, что позволяет оценить качество управления в предельных режимах работы. Второе (рис. 2.10) соответствует плавному перемещению рабочего органа манипулятора по наклонной эллиптической траектории и позволяет оценить работу СУ при перемещении на большое расстояние и как результат при значительном изменении конфигурации МР. Дополнительным условием являлось наличие компенсации динамического момента и точность его расчета.

Результаты моделирования с использованием первого воздействия и модифицированного ПИД-регулятора приведены на рисунке 3.8. Из представленных графиков видно, что в этом случае среднеквадратичная ошибка отработки задания без компенсации составляет $0,035^\circ$. Введение компенсирующей связи радикально улучшает качество управления, заключающееся в снижении величины перерегулирования и ошибки позиционирования. При этом наилучших показателей удаётся добиться при использовании динамической модели с по-

грешностью вычислений 1%. На участках с постоянной скоростью или ускорением статическая ошибка при использовании компенсации стремится к нулю. Сравнение данных показателей позволяет сделать вывод о том, что точность расчёта динамического момента имеет важное значение. Полученные результаты указывают на необходимость использования компенсации по моменту для задач контурно-позиционного управления.

Результаты моделирования второго типа задающего воздействия приведены на рисунке 3.9. Как видно из графиков, при плавных перемещениях без резких изменений скорости и ускорения и совместном перемещении звеньев СУ с ПИД-регулятором без компенсации позволяет обеспечить среднеквадратичную ошибку позиционирования, как и в первом случае, в пределах $0,03^\circ$. При этом введение компенсации также значительно уменьшает ошибку. Однако требуемое качество управления достигается уже при погрешности расчета ДМ 20% и дальнейшее повышение погрешности расчета до 1% незначительно сказывается на результате.

Анализ полученных результатов показывает, что предложенный ПИД-регулятор позволяет обеспечить требуемое качество управления в обоих случаях только при наличии компенсирующей связи. При этом влияние компенсации наиболее заметно при ступенчатых изменениях скорости и ускорения. Качество управления при использовании моделей с погрешностью расчёта динамики 1% и 20% отличается, прежде всего, скоростью минимизации ошибки позиционирования.

Для сравнения на рисунках 3.10 и 3.11 представлены графики ошибок позиционирования звеньев при использовании полиномиального регулятора.

Как видно из рис. 3.10 при перемещениях со ступенчатым изменением производных ПР позволяет добиться меньшей ошибки позиционирования в процессе перемещения за счет более высокого порядка знаменателя регулятора по сравнению с предложенным модифицированным ПИД-регулятором. Введение компенсации дополнительно снижает величину перерегулирования, но ее

влияние при движении с постоянной скоростью можно считать незначительным. При перемещении по плавной траектории (рис. 3.11), ошибка также остаётся меньшей, чем при использовании предложенного ПИД-регулятора. Погрешность расчета динамической модели (1% и 20%) в обоих случаях не оказывает существенного влияния на качество управления в статике, что объясняется низкой чувствительностью регулятора к внешним возмущениям.

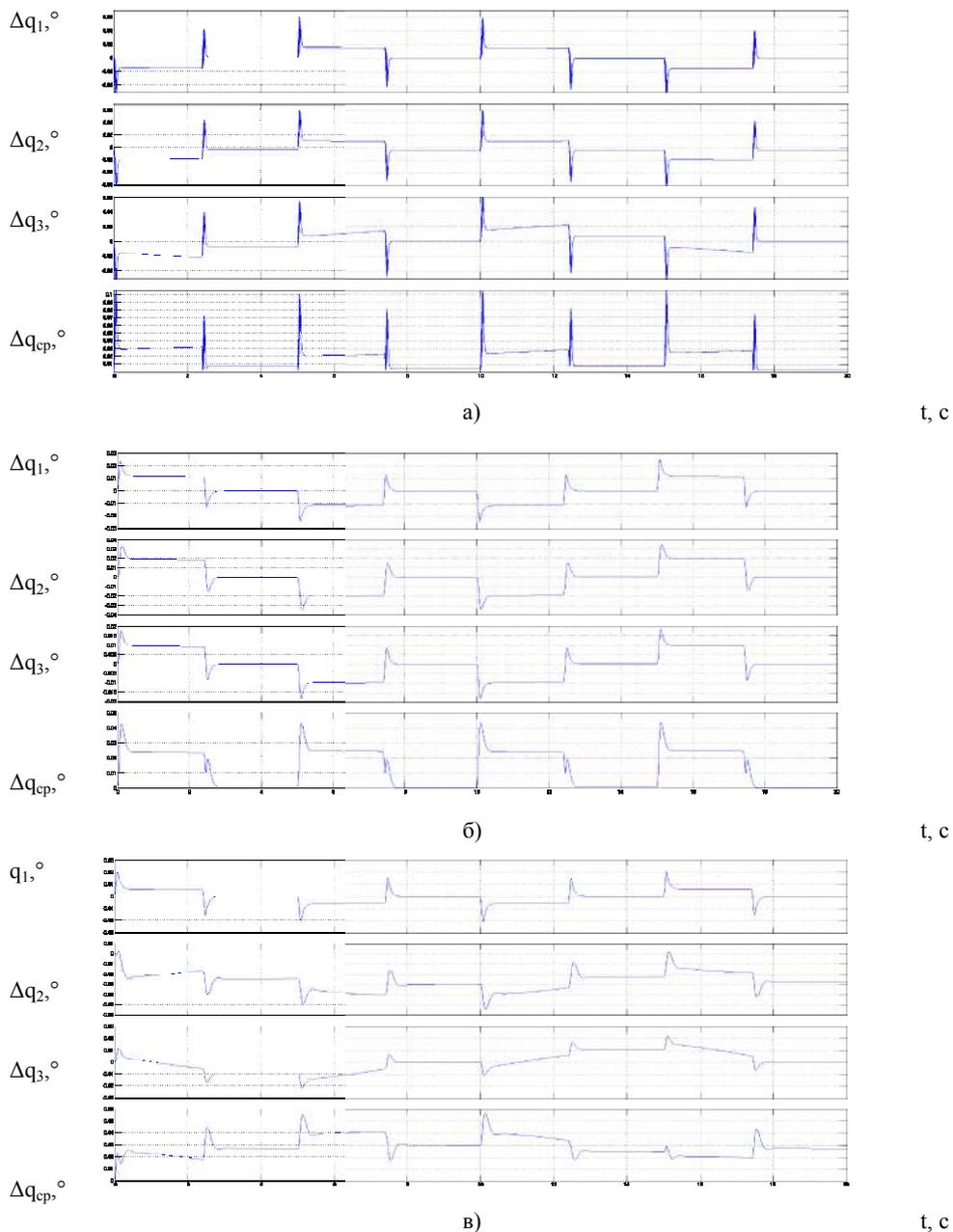


Рис. 3.8. Ошибка позиционирования при перемещениях со ступенчатым изменением производных с использованием ПИД-регулятора: а) без компенсации, б) с компенсацией (погрешность ДМ 1%), в) с компенсацией (погрешность ДМ 20%)

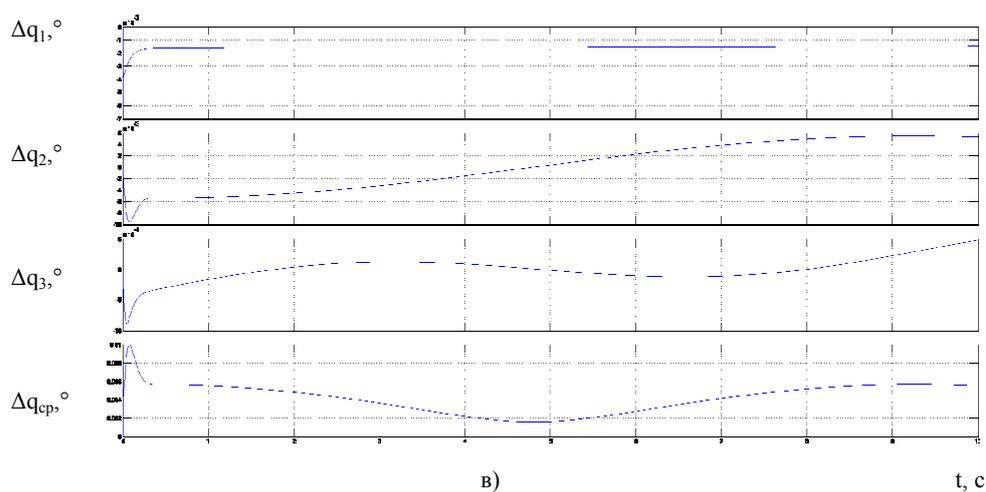
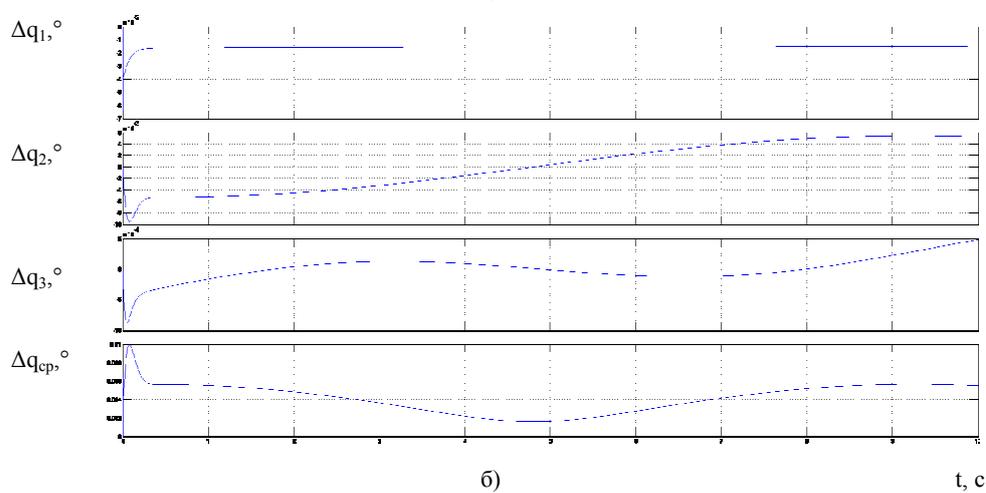
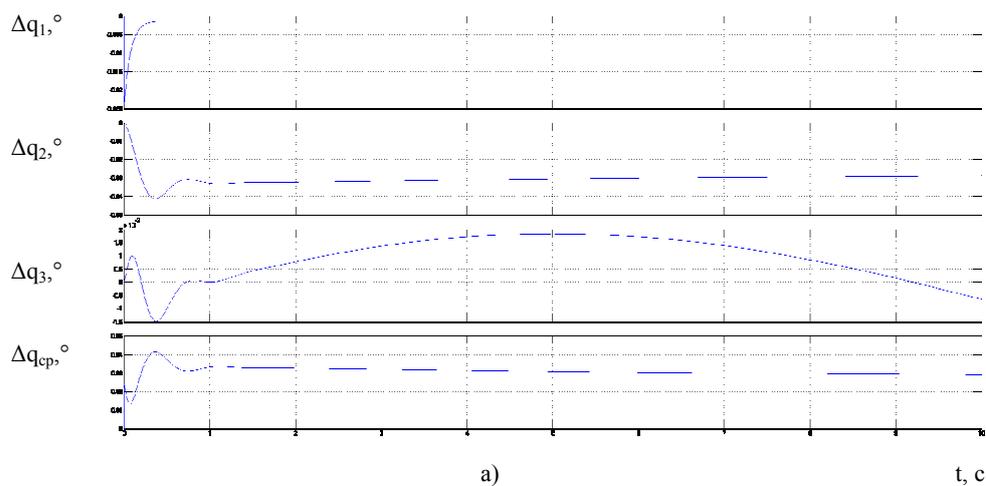


Рис. 3.9. Ошибка позиционирования при перемещении по плавной траектории при использовании ПИД-регулятора: а) без компенсации, б) с компенсацией (погрешность ДМ 1%), в) с компенсацией (погрешность ДМ 20%)

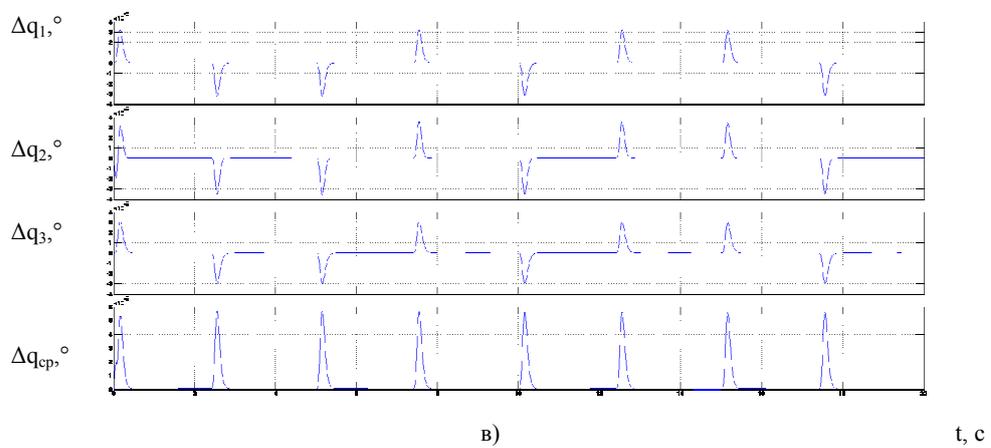
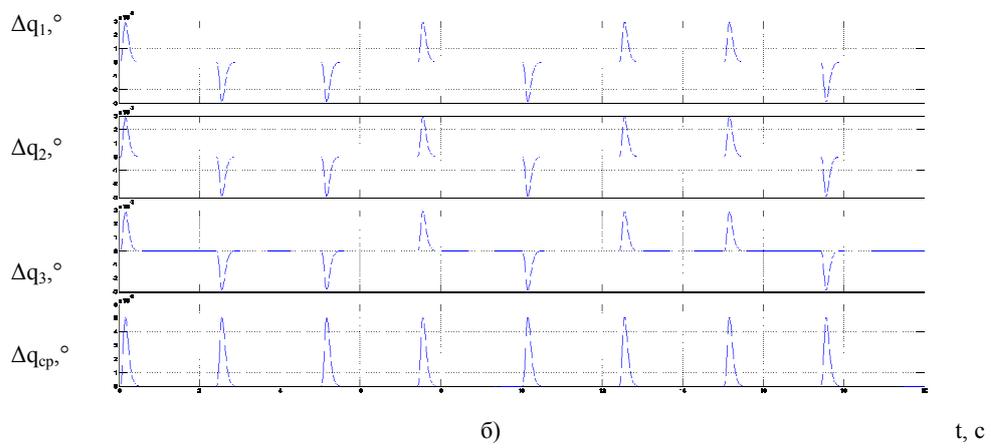
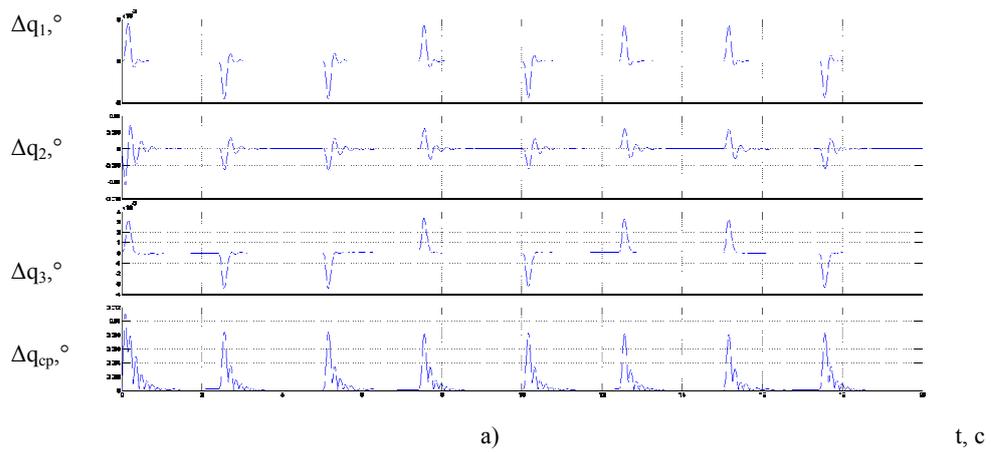


Рис. 3.10. Ошибка позиционирования при перемещениях со ступенчатым изменением производных с использованием ПР: а) без компенсации, б) с компенсацией (погрешность ДМ 1%), в) с компенсацией (погрешность ДМ 20%)

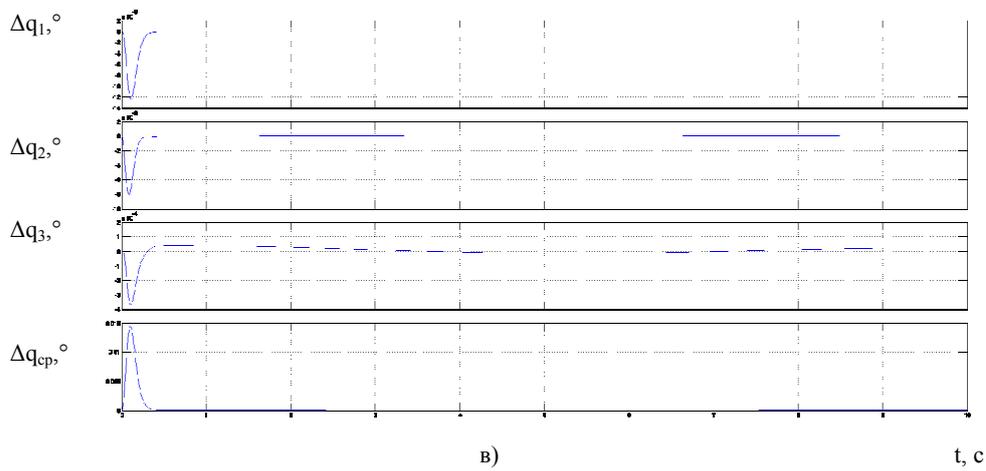
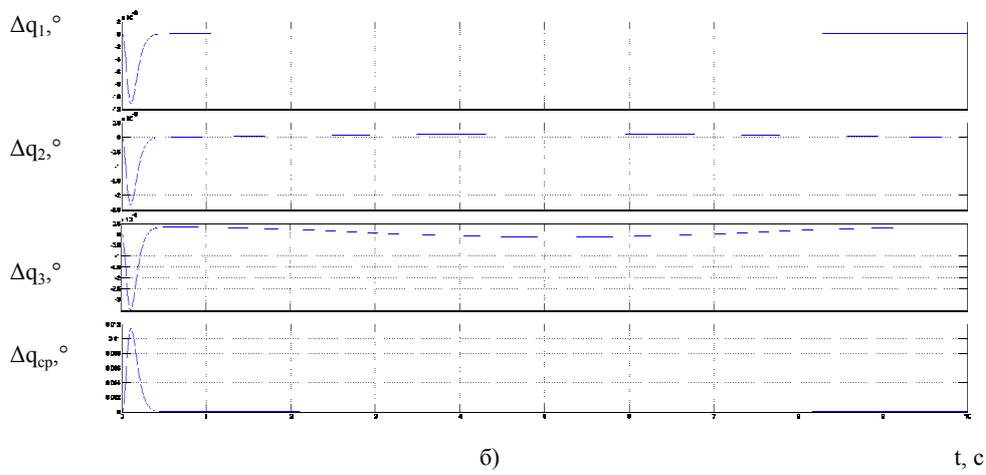
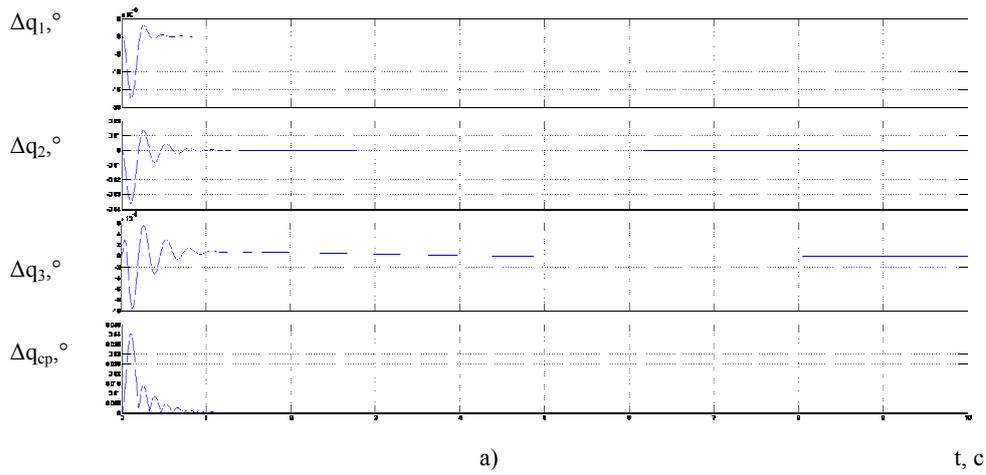


Рис. 3.11. Ошибка позиционирования при перемещении по плавной траектории при использовании ПР: а) без компенсации, б) с компенсацией (погрешность ДМ 1%), в) с компенсацией (погрешность ДМ 20%)

3.2.3. Выбор оптимальной структуры системы управления

Для достижения максимальной эффективности, процесс выбора структуры

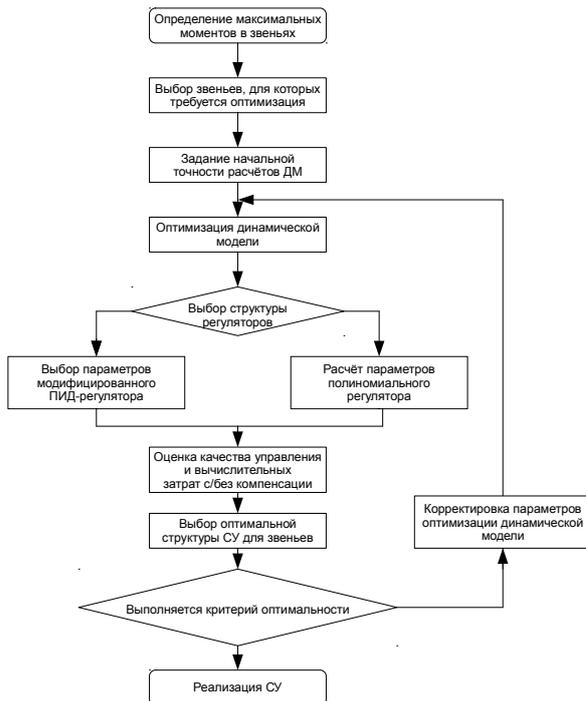


Рис. 3.12. Алгоритм выбора структуры и расчета параметров СУ

и расчета параметров СУ может быть проведен итерационно (рис. 3.12). Для этого следует, прежде всего, определить какие звенья манипулятора требуют управления с использованием динамической модели. К ним относятся звенья со значительными моментами сил, действующих на них. Для них следует провести оптимизацию ДМ с выбранным значением точности расчёта. Исходя из назначения и особенностей манипулятора, принимая во внимание проведённый выше анализ, следует провести синтез регуляторов.

В случае, если полученные результаты не удовлетворяют требованиям к конкретной реализации СУ, следует повторить расчёт с использованием скорректированных показателей точности и/или другого типа регулятора.

В целях унификации и упрощения настройки СУ целесообразно реализовать один тип регулятора для всех звеньев или, по крайней мере, для групп звеньев в зависимости от моментов, действующих на них. Основным критерием выбора в данном случае является оптимальное соотношение требуемых вычислительных ресурсов и достигаемого при этом качества управления.

В качестве задающего воздействия на входе СУ следует выбрать траекторию перемещения, соответствующую операции, которую должен выполнять манипулятора. В качестве примера можно предложить траекторию, изображённую на рис. 3.7, для транспортировочных и сборочных манипуляторов. Однако данный выбор не может гарантировать адекватность полученных результатов для любых задач, для которых будет использоваться манипулятор.

Исследования показали, что лучшие результаты для звеньев, непосредственно задействованных в процессе перемещения рабочего органа, показывает СУ с полиномиальным регулятором с компенсацией использующую динамическую модель с достаточно низкой точностью вычислений (погрешность порядка 20%). Однако данное решение требует использования значительного количества вычислительных ресурсов, что накладывает определенные требования на реализацию СУ. Альтернативным вариантом является использование предложенного модифицированного ПИД-регулятора с динамической моделью, использующей высокую точность вычислений (погрешность порядка 1%). Такое решение позволяет снизить затраты на реализацию самого регулятора, при этом сохраняя высокое качество управления за счет точного расчета компенсирующих связей.

Для звеньев, используемых, в первую очередь, для определения ориентации рабочего органа, не требуется точного расчёта динамической модели и в данном случае оказывается достаточно ПИД-регулятора без компенсации.

Комбинация данных вариантов позволит оптимально использовать имеющиеся вычислительные ресурсы СУ. Тем не менее, в реально реализуемых решениях оптимальным будет использование одностипных регуляторов для всех звеньев, в связи с устранением необходимости использования различных методик настройки параметров регулятора.

3.2.4. Разработка алгоритма формирования траектории движения

Основной задачей планировщика траектории является преобразование заданных в управляющей программе движений в последовательность управляющих сигналов. Он поддерживает набор алгоритмов, обеспечивающий расчёт основных видов траекторий, используемых в работе МР: линейных, круговых, сплайновых. В связи с необходимостью преобразования координат между различными видами КС, для их реализации используются интерполяторы, взаимодействующие с программами расчёта кинематики [83, 84, 85].

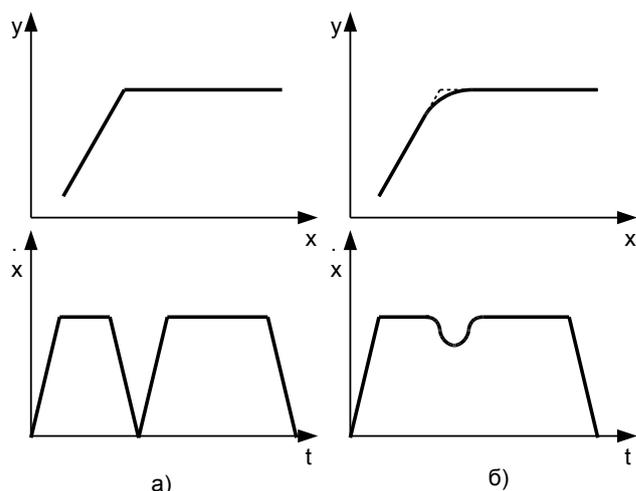


Рис. 3.13. Траектория обхода углов: а) без сглаживания, б) со сглаживанием

Построение оптимальной траектории обычно сводится к численному решению задачи минимизации времени перемещения при пространственных ограничениях с целью исключения столкновений манипулятора с предметами в рабочей зоне, учета динамики звеньев и ограничений по скоростям движения степеней подвижности или управляющих токов в двигателях.

Предполагается, что система управления робота позволяет задавать величину точности позиционирования программной точки, при достижении которой манипулятор может начать движение в очередную точку (рис. 3.13).

Возможность начинать движение к следующей точке, до достижения текущей программной точки, позволяет сглаживать траекторию в промежуточных точках и за счет этого экономить время достижения конечной точки движения. Траектория движения схвата при этом представляет собой ломаную кривую со сглаженными углами. Сглаживание углов происходит в переходном режиме движения из текущей целевой позиции в новую позицию на основании расчёта изменения производных положения до 3-го порядка на отрезках разгона/торможения отдельных участков движения так, чтобы эти изменения не превышали ограничения соответствующих величин и образовывали гладкий S-образный профиль.

Предлагаемый алгоритм приведён на рис. 3.14.

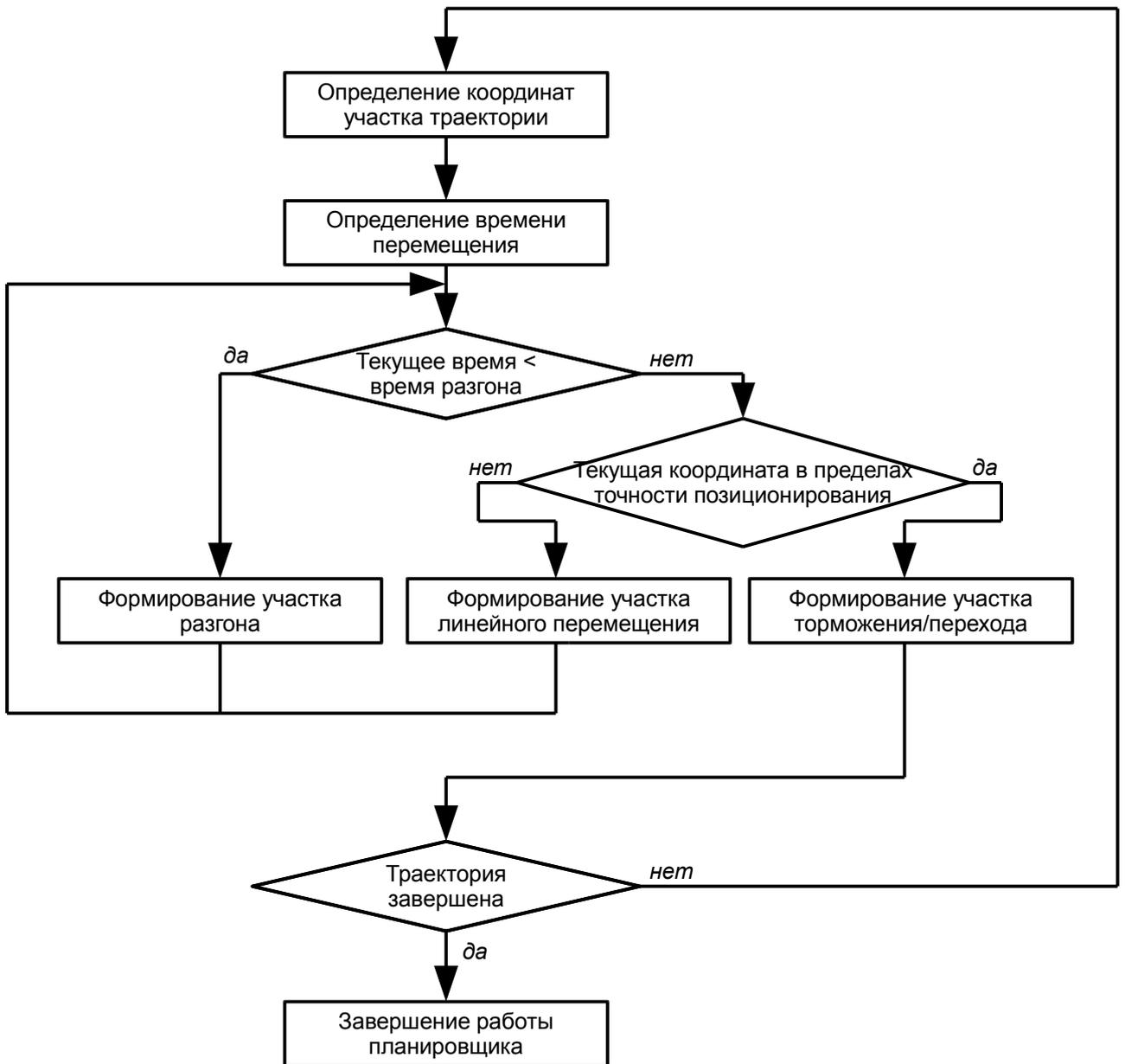


Рис. 3.14. Алгоритм планировщика траектории

Ввиду значительных затрат вычислительных ресурсов на расчет траектории целесообразно выделить планировщик в отдельную задачу, решаемую в блоке управления СУ МР, независимую от непосредственных процессов управления движением и формирования управляющего воздействия.

3.3. Выводы

1. Введение блока динамических связей в структурную схему позволяет разработать систему управления манипуляционным роботом, учитывающую изменение его динамических характеристик.

2. Измерение среднеквадратичной ошибки положения даёт возможность оценить качество управления при координированном управлении всеми осями манипулятора.

3. Исследования показали, что лучшие результаты показывает СУ с использованием ПР. При этом допустимо введение компенсации, использующей динамическую модель с достаточно низкой точностью вычислений (погрешность 20%) или отказаться от её использования. Такая система позволяет добиться нулевой статической ошибки и малого времени переходного процесса, однако имеет более сложную реализацию.

4. При значительных вариациях параметров объекта управления, например, при перемещении тяжёлых грузов, или при проявлении эффектов, связанных с упругостью звеньев, также целесообразно применение полиномиальных регуляторов, САУ с которыми обладают большей грубостью.

5. Для ПИД-регулятора введение компенсирующих связей следует признать обязательным условием для обеспечения высокого качества управления. При использовании предложенного ПИД-регулятора заданное качество управления удастся получить только с динамической моделью, использующей высокую точность вычислений (погрешность порядка 1%). Такое решение позволяет снизить затраты на реализацию самого регулятора, сохраняя при этом высокое качество управления за счет точного расчета компенсирующих связей.

6. Введение компенсирующих связей с использованием методики расчёта динамических характеристик манипулятора позволяет добиться точного выполнения заданных перемещений при существенных изменениях координат звеньев манипулятора.

7. Предложенная итерационная методика выбора структуры и расчета параметров СУ позволяет добиться оптимального соотношения качества управления и вычислительных ресурсов.

8. Предложенный алгоритм формирования траектории движения, основанный на определении точности позиционирования программной точки, позволяет снизить время перемещения и повысить плавность траектории. Учитывая значительные вычислительные затраты предложено выделить планировщик траектории в отдельную задачу.

Глава 4. Разработка программного обеспечения системы управления

4.1. Организация структуры системного программного обеспечения

Базовые подходы к организации аппаратно-программных средств СУ МР определены на основании ранее выбранной архитектуры, описанной в главе 1.

Рассмотрим первоочередные задачи, которые возникают при разработке программного обеспечения СУ, исходя из описанных принципов.

Прежде всего, следует выделить необходимость осуществления обмена информацией между отдельными уровнями аппаратного и программного обеспечения. Так как он должен вестись в режиме реального времени, и отдельные пакеты данных могут быть достаточно объемными, при выборе следует основываться на таких факторах как пропускная способность и быстродействие. [88, 89]

В связи с тем, что ранее был выбран интерфейс, основанный на стандарте Ethernet, это позволило избежать необходимости реализации полного стека протоколов, так как в настоящее время существует много стандартных решений. Таким образом, в рамках разработки СУ МР была предусмотрена возможность подключения существующих сторонних библиотек ввода-вывода, для чего в состав ПО были включены точки входа для высокоуровневого обмена информацией. Они служат для осуществления взаимодействия между системным ПО низкому уровню и средствами обмена информацией, предоставляемыми внешним интерфейсом. [86, 87]

Следующей задачей, которая была решена при разработке ПО системного уровня является выбор способа организации данных во внутренней памяти СУ. Основными требованиями к их размещению является эффективность использования доступного пространства и скорость обработки критически важной информации.

Основные типы данных, которые должны храниться в памяти представлены на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Распределение данных в памяти СУ

Наиболее эффективным способом организации указанной информации является структурный, при котором данные объединяются в единую структуру, позволяющую адресоваться к отдельным элементам, используя косвенную адресацию по их индексам.

Необходимо отметить, что для предотвращения фрагментации памяти были определены типы и количество элементов.

Конфигурационные параметры СУ и переменные состояния манипулятора занимают фиксированное пространство, которое определяется их составом и количеством, устанавливаемым на этапе проектирования системного ПО.

Количество **пользовательских переменных**, предназначенных для использования в управляющих программах, может быть найдено эмпирически или задано путем сравнения с существующими разработками. Для большинства технологических задач, как правило, достаточно нескольких сотен переменных. В связи с тем, что тип хранимых в них данных зависит от конечного пользователя, вид переменных следует выбрать исходя из требований универсальности. В данном случае наилучшим решением будет использование формата переменных с плавающей точкой.

Наибольшую сложность представляет собой размещение в памяти **управляющих программ пользователя**. В связи с тем, что их размещение происходит непосредственно во время работы, избежать фрагментации оказывается невозможным. Поэтому была реализована таблица использования памяти, согласно которой велось выделение пространства для загружаемых программ.

Описанный подход потребовал создания механизма распределения памяти в режиме реального времени, который реализован как один из модулей системного ПО блока управления.

В связи с тем, что система управления МР работает в режиме реального времени возникает третья задача, связанная с рациональным распределением времени между решаемыми задачами [90] (рис. 4.2). Основные задачи могут быть распределены по уровням приоритета следующим образом:

Высокий приоритет:

1. Синхронизация и взаимодействие с аппаратным обеспечением;
2. Коммутация управляемого оборудования и формирование управляющих сигналов;
3. Расчёт регулятора;

Низкий приоритет:

4. Управление движением (планировщик траектории, расчёт кинематики, выполнение кадра УП);
5. Системные подпрограммы высокого приоритета;

Фоновый приоритет:

6. Системные подпрограммы обычного приоритета;
7. Команды диалогового режима.

Как видно из рис. 4.2 задачи, решаемые СУ, разделены на три уровня приоритетов в соответствии с их значимостью для её работоспособности и защиты от сбоев.

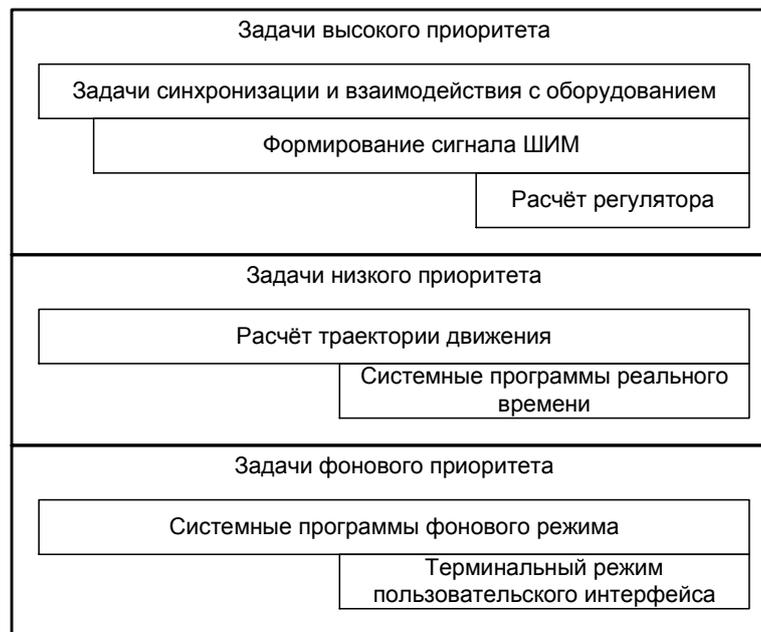


Рис. 4.2. Распределение задач по уровням приоритета

В связи с тем, что для обеспечения высокого качества управления требуется соблюдения жестких временных интервалов при формировании управляющих сигналов, высокий приоритет имеют те задачи, которые предназначены для организации стабильной работы СУ и осуществления взаимодействия с периферийным оборудованием, а также служащие для расчета и формирования управляющих сигналов. Основными признаками, по которым они могут быть выделены, являются:

1. Высокая частота обращений;
2. Жестко заданный временной интервал.

К задачам низкого приоритета относятся задачи, предназначенные для планирования движений манипулятора и осуществления основных операций, необходимых для мониторинга состояния СУ и контроля и предотвращения возможных ошибок. Они не требуют выполнения с жестко заданными временными параметрами, но являются необходимыми для формирования управляющих команд и заданий для задач высокого приоритета.

В фоновом режиме работают остальные служебные задачи, предназначенные для управления различными функциями работы СУ, а также для осуществления взаимодействия с пользователем в терминальном режиме.

Основной проблемой при разработке системы распределения времени оказалась необходимость учета корреляции быстродействия используемого контроллера движения и времени выполнения отдельных подпрограмм системного ПО.

Для её решения были разработан механизм конфигурационных переменных, определяющих приоритет отдельных задач. В соответствии с ним был спроектирован модуль распределения времени, предназначенный для переключения между отдельными процессами. Он основан на использовании системного таймера КД, по которому в соответствии с делителями, настраиваемыми для каждого из уровней приоритетов, происходит вызов соответствующих модулей системного ПО.

Особым случаем является механизм выполнения пользовательских задач, требующих синхронизации. Для этого был разработан набор средств межпроцессного взаимодействия, таких как семафоры, мьютексы (взаимоисключающие объекты), конвейеры.

Они реализованы в виде комплекта подпрограмм, использующих группу специализированных переменных в системной памяти СУ. В зависимости от типа объекта синхронизации они представлены в виде отдельного бита или целочисленного значения. Взаимодействие с ними осуществляется посредством методов блокировки/разблокировки и выделения/освобождения ресурсов.

Таким образом, предложенные решения приведенных задач позволяют создать основу для реализации основных компонентов СУ МР, описанных в главе 1.

4.2. Разработка набора средств системного ПО для формирования управляющих программ

Важным аспектом разработки любой СУ является необходимость предоставления конечному пользователю средств для написания и реализации собственных управляющих алгоритмов. Исходя из выбранной архитектуры, следует принять, что пользователь должен обладать возможностью написания собственных управляющих программ (УП) и создания библиотек подпрограмм [91].

Основной проблемой, возникающей в данном случае, является выбор способа представления и хранения информации.

В связи с тем, что в архитектуру СУ изначально заложена возможность портирования на различные аппаратные средства, управляющие программы не должны зависеть от конкретных особенностей аппаратной архитектуры. Таким образом, исключается необходимость написания пользовательских задач с использованием низкоуровневых языков программирования [92].

Так как при выполнении управляющие программы должны загружаться во внутреннюю память контроллера движения, то для ее эффективного использования, было предложено УП хранить в контроллере в виде псевдокода. Это позволяет модулю системного ПО, отвечающему за их выполнение, быстро и эффективно преобразовывать УП в последовательность исполняемых команд. Такое решение экономит ресурсы контроллера движения, однако усложняет структуру модуля выполнения управляющих команд.

Способ преобразования управляющей программы в псевдокод был определен исходя из следующих принципов:

- 1) загрузка программы не должна препятствовать работе системных модулей,
- 2) преобразование не должно зависеть от особенностей аппаратной архитектуры,
- 3) преобразование должно определяться только соглашениями о синтаксисе и структуре управляющей программы,

- 4) псевдокод должен допускать возможность обратного преобразования для отладки УП.

Основываясь на приведенных принципах, был сделан вывод, что компилятор УП рациональнее реализовать в составе системного ПО, так как это позволит избежать проблем с передачей и размещением данных в случае различных подходов к организации адресного пространства КД.

В соответствии с данными положениями был разработан модуль разбора текста управляющей программы (рис. 4.3) и его преобразования в псевдокод. Основными особенностями его структуры является наличие отдельных списков команд и синтаксических элементов, таких как метки, подпрограммы и циклы. Такой подход позволяет эффективно реализовать анализ структуры управляющей программы и формирование результирующего кода [93, 94, 95].

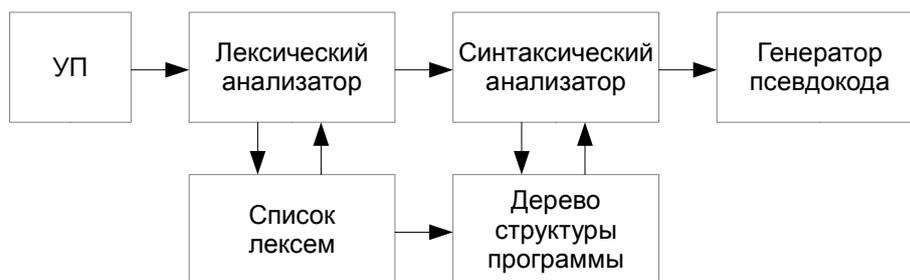


Рис. 4.3. Структура модуля разбора управляющей программы

Рассмотрим назначение отдельных компонентов модуля.

Лексический анализатор предназначен для выделения элементов из текста управляющей программы. Найденные лексические элементы индексируются и заносятся в список лексем.

На основании информации, полученной лексическим анализатором, синтаксический анализатор формирует структуру программы с использованием правил грамматики языка [96]. Она представляет собой описание команд, циклов и прочих синтаксических конструкций в виде иерархического дерева с указанием отдельных элементов и их параметров. Лексемы, найденные на преды-

дущем этапе, проверяются на соответствие ограничений по типу и представляемым значениям.

В случае, если ошибок при выполнении лексического и синтаксического разбора не обнаружено, данные передаются генератору псевдокода, который формирует окончательное представление УП, записываемое в память СУ.

В связи с тем, что важной задачей УП в СУ МР является описание необходимых перемещений для осуществления технологических операций, основное внимание при проектировании средств разработки и исполнения управляющих программ было уделено механизмам их описания [98 99].

Данная задача может быть разбита на следующие этапы:

1. Описание рабочего пространства манипулятора, включая:
 - а) задание рабочей координатной системы,
 - б) задание ограничений на перемещения в рабочей зоне,
 - в) определение пространственной конфигурации манипулятора;
2. Определение типа (точечная, линейная, круговая, сплайновая) и параметров (скорость, время) траектории перемещения;
3. Задание непосредственных перемещений;
4. Осуществление синхронизации с процессами, происходящими в СУ и внешних устройствах.

Для решения каждого из этапов указанной задачи был сформирован и реализован набор команд, предоставляющих конечному пользователю полный механизм описания требуемой технологической операции.

Другим важным фактом, является то, что управляющие программы пользователя представляют собой как программы движения, так и программы взаимодействия с внешними устройствами и электрооборудованием. Поэтому наиболее целесообразным является выделение определенного набора команд, отвечающих за непосредственное взаимодействие с ними. Это было реализовано посредством специального типа переменных, отображающих порты ввода/вывода устройств.

Особым случаем являются задачи, требующие синхронизации отдельных процессов. Для их решения предусмотрен набор команд, позволяющих управлять модулем распределения времени и использовать включенные в него средства межпроцессного взаимодействия.

4.3. Разработка языка написания управляющих программ

Следующим этапом после определения набора системных операций, требуемых для написания управляющих программ, является разработка способа написания УП.

Разработка используемого языка программирования (ЯП) требует детальной оценки преимуществ и недостатков существующих вариантов.

В связи с тем, что для языков программирования РТК не существует единого стандарта, подобного стандарту G-code (RS-274) для систем ЧПУ, производители используют собственные разработки, имеющие значительные отличия. Чтобы выбрать наиболее эффективный подход к описанию УП разрабатываемой СУ МР, рассмотрим особенности программирования РТК ведущих производителей.

Существует три основных подхода к описанию синтаксиса ЯП для РТК:

1. Использование команд с параметрами для задания траекторий и точек перемещения (ABB, Yaskawa, Motoman),
2. Использование структурированного представления данных (KUKA),
3. Использование кодовых команд (Motorola).

Рассмотрим их достоинства и недостатки.

Использование команд с параметрами позволяет записать в одной строке кода всю необходимую информацию о перемещениях, включая тип интерполяции траектории и требуемые перемещения, однако при этом теряется гибкость в задании параметров и усложняется их использование в циклических операциях, где требуется изменение отдельных параметров.

Использование структур данных для задания параметров движения делает УП более удобной для реализации сложных алгоритмов и доступа к отдельным элементам описания траектории. Недостатком данного подхода является увеличение объема кода и усложнение компилятора.

Наконец, использование кодовых программ позволяет написать программу, обладающую наименьшим размером и наиболее простую для компиляции, но при этом такая программа будет наименее читаемой.

Исходя из принципов, положенных в основу разрабатываемой СУ МР, наиболее оптимальным подходом является использование структурированного подхода, реализованного в частности в языке KRL, используемом в роботах KUKA. Особенности указанного языка были положены в основу данной разработки, в которой используется подмножество необходимых функциональных возможностей языка.

Рассмотрим реализацию отдельных функциональных возможностей языка (рис. 4.4), основываясь на принципах, описанных в главе 1.

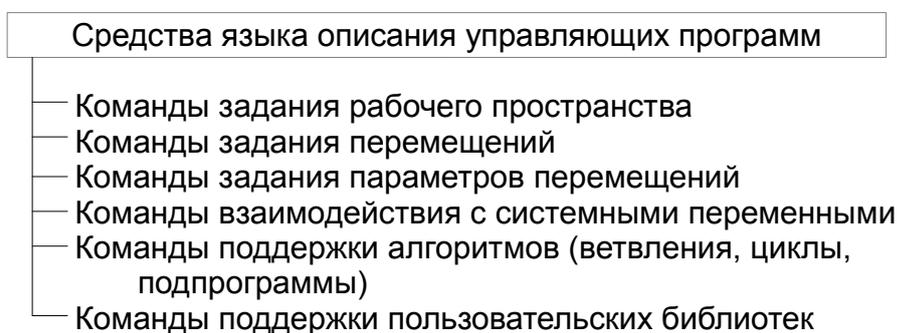


Рис. 4.4. Набор средств описания УП

Для задания перемещений используются следующие команды:

- произвольное перемещение между двумя точками (point, ptp);
- перемещение между двумя точками по линейной траектории (linear);
- перемещение по окружности с заданием определённого набора точек (начальная координата, центр окружности, конечная координата или радиус) (circle);

- перемещение между точками по сплайну (spline);
- задание скорости перемещения (speed);
- задание максимального ускорения при перемещении (accel).

Указанные команды позволяют разработчику или пользователю задать желаемую траекторию перемещения МР в рабочей области с указанием её характеристик, таких как скорость и ускорение. Следует отметить, что они работают с учётом ограничений, накладываемых планировщиком траектории, при нарушении которых СУ автоматически прерывает выполнение программы.

Учитывая, что МР может работать не в одной системе координат, в язык программирования включен набор средств, предназначенных для **преобразования между координатными системами**. Наиболее удобным с точки зрения пользователя является задание координат в виде структур, включающих элементы как рабочей, так и собственной КС МР. Данное представление позволяет использовать в одной УП координаты различных КС без необходимости пользователю следить за текущим режимом.

Представление структур основано на стандартах, существующих в языках высокого уровня общего назначения. Например, для обращения к координате в переменной, определяющей точку, разработчик должен использовать оператор обращения к компоненту структуры, за которым следует имя координаты. Такое решение позволяет сделать программу удобной для написания и анализа, по сравнению с альтернативными вариантами, такими как применение массивов элементов. Тем не менее, при использовании СУ МР с РТК, оснащённым дополнительными осями перемещения, может потребоваться введение дополнительных компонентов структуры, предназначенных для обращения к координатам дополнительных осей. В данном случае для них следует использовать массив, обращение к элементам которого удобнее сделать по номеру дополнительной оси.

Следует отметить, что при задании координат в рабочей КС может возникнуть неоднозначность при формировании траектории, в связи с тем, что одному

набору координат соответствуют несколько конфигураций МР в собственной КС. Для решения этой проблемы в состав средств языка были введены команды, указывающие **требуемую конфигурацию МР в пространстве**. Так как типы манипуляторов могут различаться по своей конфигурации, данные команды имеют не жестко заданный набор аргументов, а учитывают особенности кинематической структуры МР. Таким образом, значение их параметров определяется не описанием языка, а конкретной реализацией системного ПО СУ МР, предназначенной для использования с манипулятором.

Для организации взаимодействия УП с **системными переменными и периферийными устройствами** наиболее эффективным является определение массивов данных, отображающих в УП их состояние. Для удобства пользователя используется введение псевдонимов основных характеристик и параметров в описании языка и предоставление пользователю возможности создания собственных псевдонимов и мнемонимов для других переменных, а также входов и выходов аппаратных средств. Такое решение добавляет уровень абстрактности к взаимодействию УП и СУ, что позволяет разделить программную и физическую реализацию взаимодействия с устройствами.

Для создания сложных программ язык программирования поддерживает набор средств **алгоритмического программирования** [95], позволяющих оптимизировать процесс разработки и выполнения программы. По аналогии с языками высокого уровня к ним относятся подпрограммы, циклы, ветвления.

Подпрограммы предназначены для выделения отдельных блоков кода для многократного их использования в теле программы. Они могут использоваться как для простого выполнения команд, так и для проведения вычислений, либо иных операций, приводящих к получению результата (проверка значения системных переменных, чтение состояния системных устройств).

Циклы предназначены для организации повторяющихся операций. Следует учитывать, что в программе могут быть использованы циклы нескольких типов:

— безусловный цикл loop (цикл без условия выхода);

- параметрический цикл for (цикл с изменением значения переменной);
- цикл с предусловием while (цикл с предварительным условием).

Кроме самих циклов в языке предусмотрены команды для их досрочного прерывания и повторения (break и continue соответственно).

Команды ветвления предназначены для организации сложных программ, управляемых условными операторами. В коде программы они могут быть представлены в виде блоков условий if-else-endif, сопровождающихся наборами команд, предназначенных для отработки при выполнении/невыполнении условия.

Для создания **библиотек алгоритмов** [96] разработчик или пользователь могут воспользоваться модульным принципом построения языка программирования. Отдельные модули загружаются в исполняемую управляющую программу посредством команд и директив.

Ниже приведен фрагмент управляющей программы складирования изделий (Приложение 3), написанной с использованием разработанного языка:

```
def PutObject(ObjNo)
  pos PyrPos ; Позиция гайки
  int Level ; Ярус
  int LevelNo ; Номер гайки в ярусе
  PyrPos.x = PyrCenter.x
  PyrPos.y = PyrCenter.y
  PyrPos.z = PyrCenter.z
  PyrPos.a = PyrCenter.a
  PyrPos.b = PyrCenter.b
  PyrPos.c = PyrCenter.c
  if (ObjNo < 8) then
    ; 1.И 2-й ярус
    if ((ObjNo == 0) or
        (ObjNo == 4)) then
      PyrPos.x = PyrPos.x-50
    else
      if ((ObjNo == 1) or
          (ObjNo == 5)) then
        PyrPos.x = PyrPos.x+50
      else
        if ((ObjNo == 2) or
            (ObjNo == 6)) then
          PyrPos.y = PyrPos.y-50
          PyrPos.a = 90
```

```

else
if ((ObjNo == 3) or
   (ObjNo == 7)) then
  PyrPos.y = PyrPos.y+50
  PyrPos.a = 90
endif
endif
endif
endif
if (ObjNo > 3) then
  PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH
endif
endif
PyrPos.z = PyrPos.z+ApprHeight
PTP PyrPos
PyrPos.z = PyrPos.z-ApprHeight
PTP PyrPos
PyrPos.z = PyrPos.z+ApprHeight
PTP PyrPos
end

```

Таким образом, предлагаемый ЯП позволяет реализовывать сложные алгоритмы технологических операций, включая те, которые требуют циклической обработки или изменения параметров в процессе исполнения.

4.4. Программное обеспечение терминального устройства

Для работы с СУ МР требуется набор средств, позволяющих конечному пользователю управлять и диагностировать процессы, происходящие в ней. Для этого разработан набор средств, реализованных на уровне терминального устройства (ТУ).

Согласно предложенной архитектуре терминальное устройство должно обеспечивать решение трех основных задач:

1. Организация пользовательского интерфейса.
2. Настройка СУ МР.
3. Диагностика и наблюдение за состоянием СУ МР.

Так как указанные задачи реализуются на терминальном устройстве, в качестве которого используется промышленный компьютер, то особых ограничений на использование вычислительных ресурсов КД не накладывается.

Основной задачей ПО ТУ является организация взаимодействия пользователя с блоком управления в режиме реального времени [88]. Для решения этой задачи был разработан драйвер ввода-вывода. Его основными возможностями являются:

1. Работа в ядре ОС ТУ или в качестве процесса (службы, резидентной программы) с приоритетом реального времени.
2. Поддержка синхронного и асинхронного обмена данными между БУ и ТУ [95].
3. Предоставление средств для получения информации о состоянии СУ, манипулятора и выполняемых УП.

Взаимодействие ПО ТУ с драйвером осуществляется посредством специальной библиотеки, предоставляющей высокоуровневый доступ к его функциональным возможностям.

Для реализации указанной функциональности была создана библиотека средств обмена командами и данными с использованием выбранного интерфейса ввода-вывода.

Так как в данной разработке используется промышленный вариант Ethernet, то в качестве архитектуры механизма ввода/вывода выбрана модель OSI [100, 101]. В связи с тем, что непосредственный обмен данными должен вестись на прикладном уровне, для этого был реализован соответствующий протокол.

Предусмотрено два основных типа передаваемых данных:

1. Текстовые команды, предназначенные для управления СУ МР, а также передачи текста УП,
2. Двоичные данные, содержащие информацию о значениях отдельных переменных или потоковую информацию.

При использовании этого протокола взаимодействие с СУ МР может вестись как непосредственно с ТУ, так и через локальную сеть с удаленного терминала.

Следующим шагом после разработки драйвера явилось создание комплекса средств, предназначенных для настройки, диагностики и управления СУ МР.

Разработка ПО ТУ велась с учетом требований к внешнему виду и эффективности восприятия информации конечным пользователем. [102]

Прежде всего, следует отметить, что интерфейс пользователя должен предоставлять удобный и быстрый доступ к средствам сигнализации и устранения возможных проблем и неисправностей. Таким образом, пользователь будет иметь ясное представление о том, что происходит в СУ и иметь возможность принять меры для разрешения возникающих проблем.

Вторым важным моментом является возможность удобного редактирования, загрузки и наблюдения за исполнением УП. ТУ должно обладать средствами для ее ввода, выбора и управления исполнением, для чего в структуру ТУ была введена стандартная алфавитно-цифровая клавиатура в сочетании с функциональной клавиатурой.

Следующим требованием к ПО является возможность фонового сбора информации для последующего ее анализа. Для этого набор средств диагностики и наблюдения предусматривает возможность обмена информацией с БУ, не препятствуя работе СУ. Полученная информация может быть использована для построения графиков или для отображения значений тех или иных переменных.

Разработанные средства настройки спроектированы с учётом возможности явного изменения конфигурационных параметров СУ МР в пределах их допустимых значений, а также хранения отдельных наборов настроек для различных конфигураций манипулятора и технологических операций.

Основываясь на приведенных требованиях, был разработан комплекс средств пользовательского интерфейса, включающий оболочку пользователя (рис. 4.5) и средство диагностики (рис. 4.6).

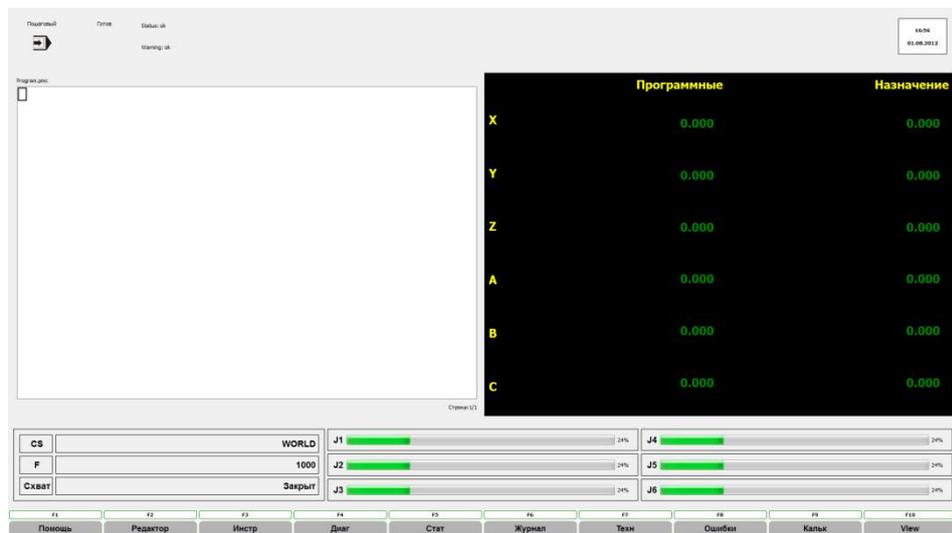


Рис. 4.5. Внешний вид оболочки пользователя

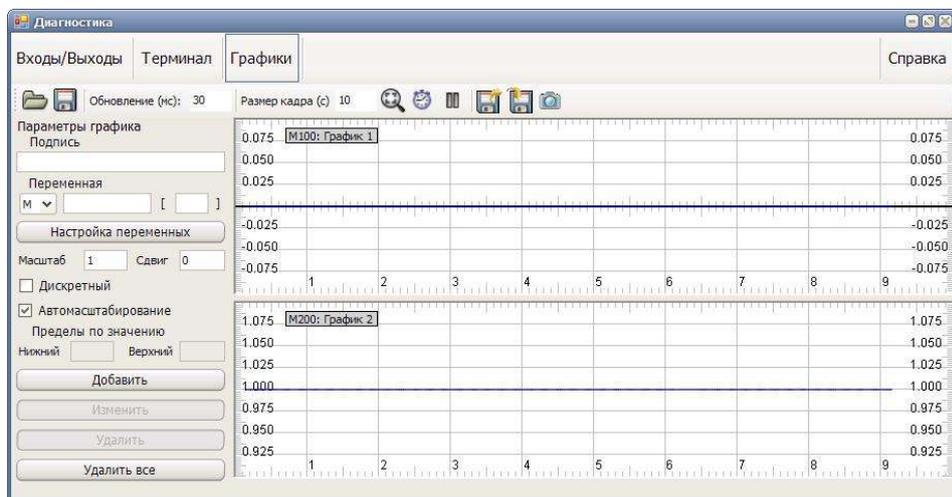


Рис. 4.6. Внешний вид средства диагностики

Разработанные программные средства позволяют организовать удобное взаимодействие пользователя с СУ. Учитывая возможности, заложенные в драйвере и протоколе обмена данными, они могут быть использованы как для непосредственного управления манипулятором, так и для удалённого наблюдения и сбора данных о состоянии СУ.

По сравнению с существующими решениями, использование разработанных средств предоставляет всю функциональность, необходимую для реализации и выполнения технологических операций, а также предусматривает воз-

возможность расширения и адаптации их к новым вариантам применения. Кроме того, при разработке принимались во внимание требования к эргономичности интерфейса и простоте в освоении оператором.

4.5. Выводы

Выделены основные компоненты системного программного обеспечения СУ МР и разработаны подходы к их реализации в рамках используемой аппаратно-программной архитектуры, основанные на эффективной организации данных в памяти, распределении вычислительных ресурсов между отдельными задачами управления, а также организации быстродействующей подсистемы обмена информацией между компонентами СУ МР.

Применение при разработке СУ МР принципа модульности позволило разделить задачи управления между отдельными модулями, что дало возможность дифференцировать их по уровням приоритетов, а также вести независимую разработку и отладку отдельных компонентов.

Разработан развитый и эффективный язык программирования с поддержкой структурированного представления данных, дающий возможность описывать сложные управляющие алгоритмы. Использование структурного подхода позволило повысить читаемость управляющих программ и сформировать библиотеку повторно используемых фрагментов кода.

Разработанный протокол обмена информацией между БУ и ТУ позволил создать средства настройки, диагностики и пользовательского интерфейса, способные взаимодействовать с СУ МР как в режиме реального времени для сбора текущей информации о состоянии СУ, так и в режиме асинхронного обмена, предназначенного для терминального управления со стороны конечного пользователя.

Глава 5. Разработка и внедрение опытного образца СУ МР

5.1. Разработка аппаратных компонентов системы управления

В соответствии с описанной ранее архитектурой построения СУ МР было выделено три основных компонента, необходимых для реализации требуемой функциональности:

1. Блок управления;
2. Терминальное устройство;
3. Силовые модули.

Блок управления представляет собой систему на базе контроллера движения, реализующую необходимые алгоритмы управления и решающую задачи системного уровня в режиме реального времени [35]. Он служит для обработки технологических программ, и формирования задания для силовых модулей и периферийных устройств, необходимых для управления манипуляционным роботом.

В состав блока управления входят многоосевой контроллер движения с числом поддерживаемых осей не менее шести, необходимый для реализации управляющих алгоритмов, набор плат обработки сигналов от датчиков положения, расположенных на осях для осуществления обратной связи с манипулятором и платы расширения для управления периферийными устройствами.

При выборе контроллера движения были определены следующий набор требований.

1. Производительность КД, обеспечивающая работу СУ с показателями быстродействия и качества, соответствующими технологическим требованиям;
2. Наличие алгоритмов управления силовыми модулями и электромеханическими компонентами, используемыми в СУ;
3. Средства для управления МР и взаимодействия с терминальным устройством;

4. Возможность создания расширения управляющих алгоритмов.

Кроме того, были учтены экономические и логистические критерии, такие как цена, доступность, наличие подробной документации.

На рынке существуют различные варианты КД (TurboPMAC фирмы Delta-Tau, Accelera фирмы Galil, SpiiPlus фирмы ACS, MultiFlex фирмы PMC) [39, 40, 41, 42, 43], определим требования к его характеристикам:

На основании указанных критериев был выбран контроллер фирмы Delta-Tau TurboPMAC2 [40]. Его основными преимуществами по сравнению с конкурентами являются:

- 1) более высокая производительность (тактовая частота до 240 МГц);
- 2) возможность реализации собственных контуров положения и тока;
- 3) возможность отдельного написания программ управления электроавтоматикой и движением;
- 4) расширенный набор алгоритмов формирования траекторий движения;
- 5) поддержка большого количества датчиков обратной связи.

В составе СУ используется восьмиосевой вариант, позволяющий управлять шестиосевым манипулятором и двумя дополнительными линейными осями. Он обеспечивает необходимый набор функциональных возможностей, который позволяет вести разработку алгоритмов, требуемых для управления манипуляционным роботом.

Для организации обмена с терминальным устройством в состав блока управления включён сетевой контроллер, позволяющий организовать обмен информацией по выбранному каналу связи.

Реализованный протокол обмена данными предоставляет следующие возможности:

- 1) высокую скорость передачи данных (до 1 Гбит/с),
- 2) увеличенную дальность передачи информации,
- 3) возможность использования существующих сетевых коммуникаций,

- 4) интеграцию устройств в локальную сеть с управляющим и мониторинговым оборудованием,
- 5) возможность использования существующего стека протоколов на терминальном оборудовании,
- 6) использование пиринговой архитектуры вместо стандартной «ведущий-ведомый».

Такое решение позволит избежать необходимости разработки дополнительных плат ввода/вывода, т. К. для подключения контроллера движения могут использоваться существующие стандартные решения.

Монтирование компонентов осуществляется в металлическом корпусе, спроектированном для эффективного размещения компонентов, позволяющего обеспечить простой доступ для сборки и обслуживания (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Блок управления системы управления манипуляционным роботом

Терминальное устройство состоит из двух компонентов: промышленного компьютера, служащего для выполнения прикладного программного обеспечения, и функциональной панели (рис. 5.2), включающей в себя жидкокристаллический монитор, функциональную и алфавитно-цифровую клавиатуры, предназначенные для организации пользовательского интерфейса.



Рис. 5.2. Функциональная панель терминального устройства

Функциональная клавиатура предназначена для управления работой СУ МР в целом, выбора рабочего режима, и контроля перемещения отдельных осей.

Шесть силовых модулей (рис. 5.3) предназначены для управления двигателями осей манипулятора. Использование специализированного быстродействующего цифрового интерфейса для передачи сигналов задания от контроллера движения к силовым модулям позволяет добиться высокого качества управления.

Используемые силовые модули IntDrive могут управлять различными типами двигателей, что даёт возможность использовать единый компонентный состав СУ для решения задач управления различными видами манипуляторов. [72].

Настройка параметров силовых модулей осуществляется в контроллере движения, что делает их взаимозаменяемыми. Кроме того, возможность удаленного конфигурирования в процессе работы даёт возможность изменять их

характеристики с использованием диагностических средств в составе прикладного ПО.

Такое решение позволяет не только конфигурировать СУ для конкретной задачи, но и архивировать предыдущие настройки для дальнейшего использования и решения сходных задач.



Рис. 5.3. Силовые модули

Разработанные компоненты вместе составляют опытный образец СУ МР, который был использован в ходе дальнейших исследований и разработки.

5.2. Внедрение опытного образца в исследовательский процесс

Следующим шагом в процессе разработки является создание полноценного опытного образца и проведение ряда исследований с целью определения эффективности выбранной архитектуры и принципов организации системы управления.

В качестве площадки для проведения исследований была выбрана научно-исследовательская лаборатория кафедры ЭиМС ИГЭУ.

Для осуществления исследований и усовершенствования СУ МР была подключена к промышленному манипуляционному роботу PUMA-560 (рис. 5.4).



Рис. 5.4. Система управления в научно-исследовательской лаборатории

Дальнейшие исследования проводились с использованием специально разработанных программных средств, позволяющих вести сбор и анализ данных о переменных состояния СУ, описанных в главе 4.

Основными направлениями исследования являлись:

1. Экспериментальная оценка качества управления с использованием разработанных алгоритмов;
2. Проверка эффективности алгоритмов оптимизации динамической модели;
3. Отладка и усовершенствование средств программного обеспечения системного и терминального уровней.

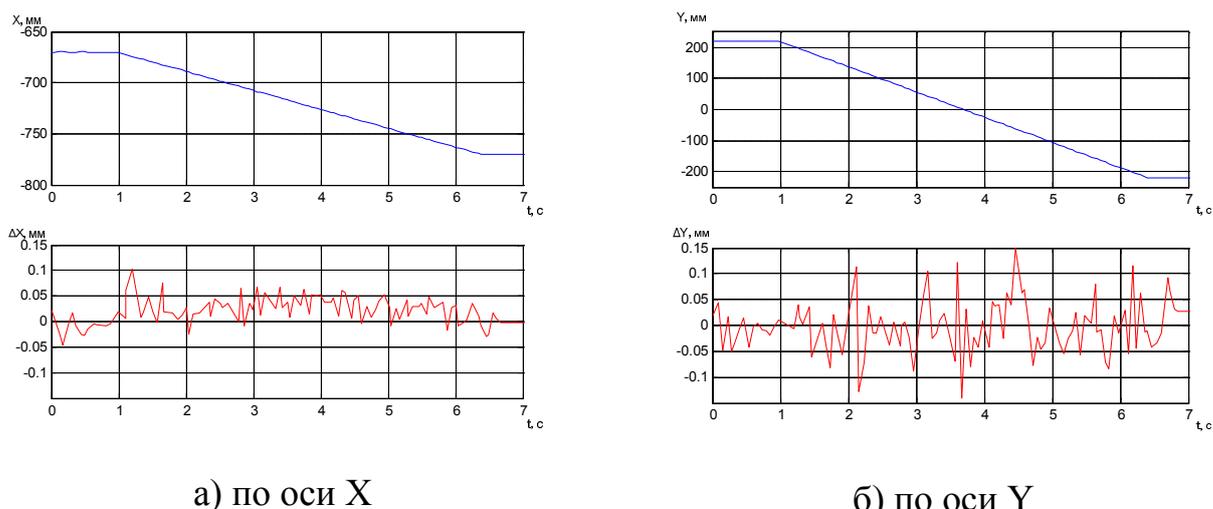
Результаты исследований по указанным направлениям приведены ниже.

В ходе исследований были подтверждены основные предположения относительно особенностей управления манипуляционными роботами, изложенные в главах 2 и 3, и сделан ряд корректировок в структуре и алгоритмах управления.

5.3. Результаты исследования системы управления

Проведённые исследования подтвердили, что разработанная система управления позволяет осуществлять управление манипуляционным роботом в реальном времени и осуществлять необходимые технологические операции.

В качестве иллюстрации сказанного приведены графики ошибки позиционирования (рис. 5.5) при перемещении по линейной траектории в плоскости ХУ.



а) по оси X

б) по оси Y

Рис. 5.5. Ошибка позиционирования при линейном перемещении

Как видно ошибка позиционирования по геометрическим осям соответствует паспортным значениям манипулятора 0,1 мм, а также удовлетворяет требованиям ГОСТ [14], что позволяет сделать вывод о том, что СУ МР обеспечивает требуемую точность. Также следует отметить, что используемый манипулятор не позволяет добиться большей точности и использование более современного МР позволит добиться лучших показателей качества.

Другим направлением исследований являлась оценка времени, необходимого для расчета динамической модели (таблица 5.1).

Таблица 5.1. Время расчёта динамической модели

Динамическая модель	Время расчёта
Полная	10 мс
Упрощённая (5%)	6 мс

Как видно расчет упрощенной модели существенно сокращает время, необходимое для вычислений, что позволяет снизить такт квантования при расчёте компенсирующего звена в регуляторах звеньев.

Третьим направлением исследований было усовершенствование программных компонентов СУ МР. На данном этапе были протестированы и скорректированы как компоненты системного программного обеспечения, так и прикладное ПО, такое как оболочка оператора.

Системное ПО было подвергнуто модификации с целью устранения оставшихся после разработки ошибок и оптимизации работы. Это позволило повысить надёжность работы СУ и снизить затраты ресурсов на выполнение управляющих алгоритмов.

Прикладное ПО было усовершенствовано в направлении расширения удобства оператора, в том числе были добавлены дополнительные диагностические режимы и средства визуализации.

Проведенные исследования показали, что базовое решение является достаточным для решения основных задач управления манипуляционным роботом. Следует отметить, что для решения более сложных вопросов следует провести дальнейшую оптимизацию с целью сокращения вычислительных затрат. Это позволит повысить общую производительность СУ и даст возможность управления современными манипуляторами, допускающими скорости перемещения до 10 м/с.

Отметим, что разработанные алгоритмы могут быть улучшены путем введения средств адаптивного управления, что позволит учесть такие особенности манипуляционных роботов, как проявление эффектов упругости и нелинейностей при повышении скоростей перемещений.

Другим направлением развития является расширение функциональных возможностей. Прежде всего, это касается обеспечения возможности синхронизации задач, выполняемых роботом с другими процессами в ГПС. Кроме того, требуется расширение набора команд, необходимых для введения в СУ средств очувствления.

Разработанная система IntNCR с манипуляционным роботом PUMA-560 была представлена на выставке «Металлообработка», проходившей в г. Москве (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Разработанная СУ МР IntNCR на выставке «Металлообработка»

5.4. Выводы

Разработка блока управления на базе контроллера движения дала возможность реализовать основные алгоритмы управления и задачи системного уровня в рамках единого специализированного устройства, работающего в режиме реального времени.

Применение промышленного протокола обмена информацией Ethernet позволило использовать существующие решения для организации взаимодействия между блоком управления и терминальным устройством, что сократило время и затраты на разработку СУ МР.

Размещение промышленного компьютера, используемого для реализации терминального устройства, в одном корпусе с блоком управления повысило помехозащищённость СУ МР.

Использование силовых модулей, обладающих специализированным цифровым интерфейсом управления, определяет высокий уровень качества управления. Конфигурирование и реализация управляющих алгоритмов в блоке управления позволило сделать модули взаимозаменяемыми.

Экспериментальные исследования, проведённые с использованием опытного образца, показали соответствие разработанной СУ МР требованиям ГОСТ и подтвердили возможность её использования для решения технологических задач.

Основные выводы и результаты работы

1. Предложенные принципы построения аппаратной и программной архитектуры позволяют разработать систему управления манипуляционными роботами, соответствующую требованиям, предъявляемым современной промышленностью.

2. Подход, положенный в основу двухпроцессорной архитектуры может быть использован для управления не только МР, но и близкими категориями оборудования, например, металлообрабатывающими станками. Такое решение позволяет совместно использовать различные виды МР, станков и других устройств для создания гибких производственных систем.

3. Описанная обобщённая математическая модель даёт возможность осуществлять формирование траектории перемещения рабочего органа манипулятора с учетом рассчитанных моментов, действующих на него, что в итоге позволяет повысить точность перемещения.

4. Разработан метод оптимизации вычислений, использованный при описании динамической модели, который позволяет проводить вычисления с требуемой точностью, при этом минимизируя используемые ресурсы, что делает его наиболее удобным для выполнения численных расчётов в реальном времени.

5. Предложены варианты реализации регуляторов положения СУ МР, позволяющих осуществлять контурно-позиционное управление звеньями манипулятора при существенных изменениях сил, действующих на них.

6. Предложена методика настройки параметров СУ МР для использования в различных режимах работы с применением двухкритериального подхода, основанного на оценке качества управления при различных задающих воздействиях.

7. Описан алгоритм формирования траектории движения по криволинейным траекториям, позволяющий минимизировать время перемещения за счёт сопряжения отдельных сегментов перемещения за счёт объединения участков разгона/торможения на их границах.

8. Разработанная структура программных средств ориентирована на качественное и стабильное управление МР применительно к широкому кругу технологических задач, выполняемых им. Система распределения времени позволяет добиться повышения устойчивости в работе и гарантировать качественную работу базовых программных компонентов СУ. Организация компонентов системного ПО по модульному принципу даёт возможность проводить их отладку и усовершенствование независимо друг от друга.

9. На основании разработанного языка программирования с поддержкой структурированного представления данных и средств реализации сложных управляющих алгоритмов организован механизм написания управляющих технологических программ.

10. Реализован опытный образец, построенный на основании предложенных принципов, результаты испытаний которого подтвердили соответствие разработанной СУ МР существующим технологическим требованиям.

Список использованной литературы

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир– 1989. – 624 с.
2. Юревич Е.И. Управление роботами и робототехническими системами. СПб. – 2001. – 168 с.
3. Шахинпур М. Курс робототехники. М.: Мир– 1990. – 527 с.
4. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана– 2004. – 480 с.
5. Фролов К.В. Механика промышленных роботов. Кн. 1: Кинематика и динамика. – М.:Высшая школа – 1988. – 304 с.
6. А.Н. Горитов, С.М. Алфёров. Сглаживание траекторий перемещения рабочего органа робота манипулятора// Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2006 г. № 8. – с. 176-179.
7. Конструкции промышленных роботов: Учеб. Пособие для СПТУ/ Е.М.Канаев, Ю.Г. Козырев, Б.И. Черпаков, В.И. Царенко. М.: Высш. шк., 1987. – 95 с.
8. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат. 1982. – 392 с.
9. Робототехника и гибкие автоматизированные производства, под ред. И.М. Макарова, учеб. пособие для втузов. Кн. 2. Приводы робототехнических систем, Ж.П. Ахромеев, Н.Д. Дмитриева, В.М. Лохин и др.; под общ. ред. И.М. Макарова. - М.: Высш. шк., 1986. - 175 с.
10. Роботизированные производственные комплексы/Ю. Г. Козырев, А. А. Кудинов, В. Э. Булатов и др.; Под ред. Ю. Г. Козырева, А. А. Кудинова. – М.: Машиностроение, 1987. – 270 с.
11. ГОСТ 25685-85. Роботы промышленные. Классификация. М.: Изд-во стандартов, 1983.
12. ГОСТ 12.2.072-82. Роботы промышленные, роботизированные технологические комплексы и участки. Общие требования безопасности. М.: Изд-во стандартов, 1982.

13. ГОСТ 25686-85. Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. М.: Изд-во стандартов, 1985.
14. ГОСТ 4.480-87. Систем показателей качества продукции роботы промышленные, номенклатура основных показателей. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
15. Abb.com
16. <http://robot.fanucamerica.com>
17. <http://www.kuka-robotics.com/russia/ru/>
18. <http://www.motoman.com>
19. <http://robotics.kawasaki.com>
20. B. S. Michael Samuelian. A Universal Approach for implementing Real-Time Industrial Ethernet. White Paper: IXXAT and Altera [сетевой ресурс].
21. Alexandra Dopplinger. Using IEEE 1588 for synchronization of network-connected devices. [сетевой ресурс]
22. Алексей Чернобровцев. Ethernet в промышленности//ComputerWorld Россия. – 2000, № 32 [сетевой ресурс]
23. KUKA Robot Language Manual
24. Инструкция по эксплуатации Сфера-36
25. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. – М.: Наука, 1978. - 398 с.
26. Кулешов В. С., Лакота Н. А. Динамика систем управления манипуляторами. М.: Энергия, 1971. 304 с.
27. Кулешов В. С., Лакота Н. А. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.
28. С.Н. Григорьев. Принципы создания многофункциональной системы числового программного управления технологическим оборудованием на базе общего ядра с открытой модульной архитектурой// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 5.

29. Андреев А.Г., Григорьев С. Н. Построение компьютерных систем программного управления мехатронными устройствами по модульному принципу // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №10.
30. <http://www.vmztl.ru>
31. ElMaraghy Hoda. Changable and Reconfigurable Manufacturing Systems. – Springer, 2009. – 405 p.
32. Попов Е.П. Робототехника и гибкие производственные системы. М.: Наука, 1987. – 192 с.
33. С.Ф. Бурдаков А., В.А. Дьяченко. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов. М.: Высшая школа, 1986. – 264 с.
34. Красильникъянц Е.В., Бурков А.П., Иванков В.А. Применение контроллеров движения для систем управления электромеханическими объектами // Мехатроника, Автоматизация, Управление. Вып. 2. 2008. – с. 45-50.
35. Красильникъянц Е. В., Варков А. А., Тютиков В. В. Система управления манипуляционным роботом// Автоматизация в промышленности. - №5. – 2011. – С. 38-44.
36. Справочник по промышленной робототехнике. В 2-х книгах. Под ред. Ш. Нофа -М.: Машиностроение. 1989. – 480 с.
37. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов, промышленных роботов и роботизированных комплексов. Учебное пособие.-М.: Высш.школа, 1986.-264 с.
38. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Основы сетей передачи данных. - М.: ИНТУИТ.РУ, 2003
39. <http://www.acsmotioncontrol.com>
40. <http://www.deltatau.com>
41. <http://www.galilmc.com>
42. <http://www.pmccorp.com>

43. <http://www.pmdcorp.com>
44. Козлов Ю.М. Адаптация и обучение в робототехнике. М.: Наука, 1990. – 248 с.
45. Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы / Машиноведение. 1988. – 392 с.
46. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. М.: Наука, 1989. – 368 с.
47. Динамика управления роботами / В.В. Козлов, В.П. Макарычев, А.В. Тимофеев и др.; Под ред. Е.И. Юревича. М.: Наука, 1984. – 334 с.
48. Armstrong B., Khatib O., Burdick J. The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm // Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1986.
49. Corke P. I., Armstrong B. S. A Search for Consensus Among Model Parameters Reported for the PUMA 560 Robot. In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1608–1613, 1994.
50. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. – 832 с.
51. R. S. Hartenberg and J. Denavit, “A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices,” Journal of Applied Mechanics, vol. 77, pp. 215–221, June 1955
52. D’Souza A., Vijayakumar S., Schaal S. Learning inverse kinematics // Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on / IEEE. Vol. 1. 2001. P. 298–303.
53. Tolani D., Goswami A., Badler N. I. Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs // Graphical models. 2000. Vol. 62, no. 5. P. 353–388.
54. Лебедев П.А. Кинематика пространственных механизмов. М.: Машиностроение, 1967. – 280 с.

55. И. Л. Кантор, А. С. Солодовников. Гиперкомплексные числа. — М.: Наука, 1973. — 144 с.
56. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. М.: Наука, 1976. — 104 с.
57. Тертычный-Даури В. Динамика робототехнических систем. Санкт-Петербург, 2012. — 128 с.
58. Овакимов А.Г. Об особых положениях одноконтурных пространственных механизмов с несколькими степенями свободы // Машиноведение. М.1989, № 4. — с. 11-18.
59. Основы динамики промышленных роботов. Коловский М.З., Слоущ А.В. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1988. — 240 с.
60. Попов Е.П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1980 — 400 с.
61. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел.- М.: Мир,1980 — 292 с.
62. Balafoutis C, Patel R., Misra P. Efficient modeling and computation of manipulator dynamics using orthogonal cartesian tensors. IEEE J. of Rob. and Autom., 4, N 6, с.665-676.
63. Погорелов Д.Ю., "Алгоритмы синтеза и численного интегрирования уравнений движения систем тел с большим числом степеней свободы", VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Пермь, 2001, с. 490.
64. Mladenova C. Mathematical modeling and control of manipulator systems. Int. J. Robotics and computer-integrated manufacturing, vol. 8, N 4, 1991, pp. 233-242.
65. Balafoutis C, Patel R., Misra P. Efficient modeling and computation of manipulator dynamics using orthogonal cartesian tensors. IEEE J. of Rob. and Autom., 4, N 6, с.665-676.

66. R. Featherstone, D. Orin, Robot Dynamics: Equations and Algorithms, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, April 2000.
67. Ju M.S., Mansor J.M. Comparison of methods for developing the dynamics of rigid body systems. Int. J. Rob. Res., N6, 1989, с.19-27.
68. Corke Peter. The Unimation Puma Servo System. CSIRO. 1994.
69. Голубенцев Н.Д., Халфен А.А. Некоторые вопросы оценки качества роботов-манипуляторов: Робототехника. I., 1976, с.29-33.
70. Саблин А.Д., Сорин В.М. Некоторые методы оценки точности позиционирования манипулятора. В кн.: Робототехника. Л.: 1976, с.50-54.
71. Кузовков Н. Модальное управление и управляющие системы. – М.: 1976. – 184 с.
72. Красильникъянц Е. В., Бурков А. П., Смирнов А. А., Бурков Г. А. Цифровой асинхронный электропривод подачи//РИТМ, №4, 2012. – с. 44-49.
73. Verdonck Walter, Swevers Jan. Improving the Dynamic Accuracy of Industrial Robots by Trajectory Pre-Compensation. // Proceedings. 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 20002.
74. Somsawas Tungpataratanawong, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki. Robust Motion Control of Industrial Robot Based on Robot Parameter Identification and Feedforward Control Considering Resonant Frequency. // IEEJ Trans. IA, Vol. 125. 2005.
75. Тютиков В. В., Красильникъянц Е. В., Варков А. А. Система управления манипуляционным роботом с компенсацией динамических моментов// Автоматизация в промышленности// №6. – 2015. – С. 58-63.
76. Popov A., Farag A., Werner H. Tuning of a PID controller Using a Multi-objective Optimization Technique Applied to A Neutralization Plant. - 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05, 12-15 Dec. 2005, p.7139 - 7143.

77. Ротач В.Я. К расчету оптимальных параметров реальных ПИД-регуляторов по экспертным критериям// Промышленные АСУ и контроллеры. №2, 2006. с. 22-29.
78. Вукобратович М. К. Н., Стокич Д. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами. Мир, 1989. – 376 с.
79. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат. 1984.
80. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами. Иваново. 2000. – 212 с.
81. Тютиков В. В., Тарарыкин С. В. Робастное модальное управление технологическими объектами. Иваново. 2006. – 256 с.
82. Анисимов А.А., Тарарыкин С. В. Методы параметрической оптимизации полиномиальных регуляторов электромеханических систем // Электричество. – 2008. – №3. – С. 52-58.
83. L. Biagiotti, C. Melchiorri, Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots, Springer, 2008.
84. Guan, Y., Yokoi, K., Stasse, O., Kheddar, A. On robotic trajectory planning using polynomial interpolations // Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2005 IEEE International Conference. Pp. 111-116.
85. Marek Boryga. Trajectory Planning of an End-Effector for Path with Loop// Journal of Mechanical Engineering. 2014.
86. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 4-е изд. - "Питер", 2003. - 992 с.
87. Темников Ф.Е и др. Теоретические основы информационной техники. - М.: Энергия, 1979. - 512 с.
88. К. Ю. Богачев. Операционные системы реального времени. – М.: 2000.
89. Бройнль Т. Встраиваемые робототехнические системы: проектирование и применение мобильных роботов со встроенными системами управления. – М.: ИКИ, 2012. – 520 с.

90. Тютиков В. В., Красильникъянц Е. В., Варков А. А. Компоненты программного обеспечения манипуляционного робота// Вестник ИГЭУ – Вып. 4. – 2011. – С. 40-43.
91. Красильникъянц Е. В., Варков А. А., Тютиков В. В. Программное обеспечение системы управления IntNCR манипуляционным роботом// Мехатроника. Автоматизация. Управление// №3. – 2012. – С. 31-36.
92. Стандарт МЭК 6-1163/3. «Программируемые контроллеры. Часть 3: Языки программирования».
93. Ахо А., Ульман Дж. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. – М.: Мир, 1978. – 612 с.
94. Серебряков В. И. Лекции по конструированию компиляторов. – М.: МГУ, 1993. – 171 с.
95. Дал У., Дейкстра Э., Хоор К. Структурное программирование. – М.: Мир, 1975. – 248 с.
96. Кнут Д. Искусство программирования, том 1. Основные алгоритмы. 3-е издание. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2000. – 720 с.
97. Елисеев С., Свинин М., Смелягин А. Математическое и программное обеспечение в исследованиях манипуляционных систем. М: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. – 294 с.
98. ГОСТ 24836-81. Устройства программного управления промышленными роботами. Методы кодирования и программирования
99. ГОСТ 27696-88. Промышленные роботы. Интерфейсы. Технические требования
100. А. Филимонов. Построение мультисервисных сетей Ethernet. — М.: ВHV, 2007. – 592 с.
101. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. - ВОС. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель.

102. А. Баканов, А. Обознов. Эргономика пользовательского интерфейса. От проектирования к моделированию человеко-компьютерного взаимодействия. – М.: 2011. – 176 с.

Приложения

Приложение 1

Матрицы для расчета динамических характеристик

$$a_{11}=2,57+1,38CC2+0,30SS23+7,44 \cdot 10^{-1}C2S23;$$

$$a_{12}=6,90 \cdot 10^{-1}S2-1,34 \cdot 10^{-1}C23+2,38 \cdot 10^{-2}C2;$$

$$a_{13}=-1,34 \cdot 10^{-1}C23-3,97 \cdot 10^{-3}S23;$$

$$a_{14}=0; a_{15}=0; a_{16}=0;$$

$$a_{22}=6,79+7,44 \cdot 10^{-1}S3;$$

$$a_{23}=0,333+3,72 \cdot 10^{-1}S3-1,1 \cdot 10^{-2}C3;$$

$$a_{24}=0; a_{25}=0; a_{26}=0;$$

$$a_{33}=1,16;$$

$$a_{34}=-1,25 \cdot 10^{-3}S4S5;$$

$$a_{35}=1,25 \cdot 10^{-3}C4C5;$$

$$a_{36}=0;$$

$$a_{44}=0,20; a_{45}=0; a_{46}=0;$$

$$a_{55}=0,18; a_{56}=0; a_{66}=0.$$

$$b_{112}=-2,76SC2+7,44 \cdot 10^{-1}C223+0,60SC23-2,13 \cdot 10^{-2}(1-2SS23);$$

$$b_{113}=7,44 \cdot 10^{-1}C2C23+0,6SC23+2,2 \cdot 10^{-2}C2S23-2,13 \cdot 10^{-2}(1-2SS23);$$

$$b_{114}=-2,5 \cdot 10^{-3}SC23S4S5+8,6 \cdot 10^{-4}C4S5-2,48 \cdot 10^{-3}C2C23S4S5;$$

$$b_{115}=-2,5 \cdot 10^{-3}(SS23S5-SC23C4C5)-2,49 \cdot 10^{-3}C2(S23S5-C23C4C5)+8,6 \cdot 10^{-4}S4S5;$$

$$b_{116}=0; b_{123}=2,67 \cdot 10^{-1}S23-7,58 \cdot 10^{-3}C23;$$

$$b_{124}=0; b_{125}=0; b_{126}=0; b_{134}=0; b_{135}=0; b_{136}=0; b_{145}=0; b_{146}=0;$$

$$b_{156}=0; b_{212}=0; b_{213}=0;$$

$$b_{214}=1,64 \cdot 10^{-3}S23-2,5 \cdot 10^{-3}C23C4S5+2,48 \cdot 10^{-3}S2C4S5+0,3 \cdot 10^{-3}S23(1-2SS4);$$

$$b_{215}=-2,5 \cdot 10^{-3}C23S4C5+2,48 \cdot 10^{-3}S2S4S5-6,42 \cdot 10^{-4}C23S4;$$

$$b_{216}=0; b_{223}=2,2 \cdot 10^{-2}S3+7,44 \cdot 10^{-1}C3;$$

$$b_{224}=-2,48 \cdot 10^{-3}C2S4S5;$$

$b_{225} = -2,5 \cdot 10^{-3} S5 + 2,48 \cdot 10^{-3} (C3C4C5 - S3S5);$
 $b_{226} = 0; b_{234} = -2,48 \cdot 10^{-3} C2S4S5;$
 $b_{235} = -2,5 \cdot 10^{-3} S5 + 2,48 \cdot 10^{-3} (C3C4C5 - S3S5);$
 $b_{236} = 0; b_{245} = 0; b_{246} = 0; b_{256} = 0; b_{312} = 0; b_{313} = 0;$
 $b_{314} = -2,5 \cdot 10^{-3} C23C4S5 + 1,64 \cdot 10^{-3} S23 + 0,3 \cdot 10^{-3} S23(1 - 2SS4);$
 $b_{315} = -2,5 \cdot 10^{-3} C23S4C5 - 6,42 \cdot 10^{-4} C23S4;$
 $b_{316} = 0; b_{323} = 0; b_{324} = 0; b_{325} = -2,5 \cdot 10^{-3} S5; b_{326} = 0; b_{334} = 0;$
 $b_{335} = -2,5 \cdot 10^{-3} S5; b_{336} = 0; b_{345} = -2,5 \cdot 10^{-3} S4C5; b_{346} = 0;$
 $b_{356} = 0; b_{412} = -b_{214}; b_{413} = -b_{314}; b_{414} = 0; b_{415} = -6,42 \cdot 10^{-4} S23C4;$
 $b_{416} = 0; b_{423} = 0; b_{424} = 0; b_{425} = 6,42 \cdot 10^{-4} S4; b_{426} = 0; b_{434} = 0;$
 $b_{435} = 6,42 \cdot 10^{-4} S4; b_{436} = 0; b_{445} = 0;$
 $b_{446} = 0; b_{456} = 0; b_{512} = 0; b_{513} = -b_{315};$
 $b_{514} = -b_{415}; b_{515} = 0; b_{516} = 0;$
 $b_{523} = -b_{325}; b_{524} = -b_{425}; b_{525} = 0; b_{526} = 0;$
 $b_{534} = b_{524}; b_{535} = 0; b_{536} = -b_{356};$
 $b_{545} = 0; b_{546} = -b_{456}; b_{556} = 0;$
 $b_{612} = b_{126}; b_{613} = b_{136}; b_{614} = b_{146}; b_{615} = b_{156}; b_{616} = 0;$
 $b_{623} = 0; b_{624} = b_{246}; b_{625} = b_{256}; b_{626} = 0;$
 $b_{634} = b_{624}; b_{635} = b_{625}; b_{636} = 0;$
 $b_{645} = b_{456}; b_{646} = 0; b_{656} = 0;$

$c_1 = 0; c_2 = g_1 C2 + g_2 C2 + g_3 S2; c_3 = g_2 S23 + g_4 C23;$
 $c_4 = -g_5 S23S4S5; c_5 = g_5 (C23S5 + S23C4C5); c_6 = 0;$

Приложение 2

Основные команды языка программирования

Команда	Назначение
bool	Определение Булевой переменной
break	Прерывание цикла
circ	Перемещение по дуге окружности

continue	Начало новой итерации цикла
def...end	Начало/конец функции
delay	Задержка выполнения программы
for...endfor	Параметрический цикл
if...else...endif	Условный оператор
int	Определение целочисленной переменной
lin	Перемещение в указанную точку по линейной траектории
loop...endloop	Бесконечный цикл
pos	Определение переменной типа «положение»
ptp	Перемещение в указанную точку
real	Определение переменной с плавающей точкой
switch...endswitch	Оператор выбора
while...endwhile	Цикл с предусловием

Приложение 3

Пример управляющей программы

Программа выполняет циклическую сборку и разборку пирамиды из гаек (рис. П.1). Изначально гайки расположены на столе в три ряда по три столбца (рис. П.2), каждый из которых содержит по две-три гайки.

Координаты размещения магазина и пирамиды задаются в виде переменных в программе. На первом этапе происходит формирование двух нижних ярусов, состоящих из 4 гаек, расположенных в виде ромба. Далее формируются третий и четвертый уровни, на которые помещаются три гайки вдоль большой диагонали ромба. Пятый и шестой уровни содержат по две гайки, и наконец, седьмой и восьмой формируют вершину пирамиды.



Рис. П.1. Собранная пирамида



Рис. П.2. Сборка пирамиды в процессе

```
global def Pyramid()  
    ; Центр пирамиды  
    pos PyrCenter  
    ; Угол магазина  
    pos PoolCorner
```

```

; Шаг магазина по горизонтали и вертикали
int PoolStepH, PoolStepV
; Размермагазина
int PoolSize
; Высота гайки
int ObjH
; Номер строки, столбца и уровня магазина
int Row, Col, No
; Номергайки
int ObjNo
; Высотাপодхода
int ApprHeight

PoolCorner = {X -700, Y 200, Z -200, A 0, B 180, C 0}
PyrCenter = {X 700, Y -150, Z -200, A 0, B 180, C 0}
PoolStepH = 80
PoolStepV = 40
ObjH = 18
ApprHeight = 50

$vel=100

loop
Construct()
Deconstruct()
endloop
end

def Construct()
No = 2 ObjNo = 0
while No>=0
if (No == 2) then
Col = 2
else

```

```

        Col = 0
    endif
    while Col<3
        if ((No == 2) and (Col == 2)) then
            Row = 1
        else
            Row = 0
        endif
        while Row<3
            TakeObjectC(Row, Col, No)
            MiddlePoint()
            PutObjectC(ObjNo)
            MiddlePoint()
            Row = Row+1
            ObjNo = ObjNo+1
        endwhile
        Col = Col+1
    endwhile
    No = No-1
endwhile
end

```

```

def Deconstruct()
    No = 0 ObjNo = 19
    while ObjNo>=0
        Col = 3
        while Col>=0
            Row = 3
            while Row>=0
                TakeObjectD(ObjNo)
                MiddlePoint()
                PutObjectD(Row, Col, No)
                MiddlePoint()
                Row = Row-1
            endwhile
            ObjNo = ObjNo-1
            Col = Col-1
        endwhile
    endwhile
end

```

```

        ObjNo = ObjNo-1
    endwhile
    Col = Col-1
endwhile
No = No-1
endwhile
end

def TakeObjectC(Row, Col, No)
    pos PoolPos
    PoolPos.x = PoolCorner.x+Col*PoolStepV
    PoolPos.y = PoolCorner.y+Row*PoolStepH
    PoolPos.z = PoolCorner.z+No*ObjH
    PoolPos.a = PoolCorner.a
    PoolPos.b = PoolCorner.b
    PoolPos.c = PoolCorner.c

    PoolPos.z = PoolPos.z+ApprHeight
    PTP PoolPos

    PoolPos.z = PoolPos.z-ApprHeight
    PTP PoolPos

    PoolPos.z = PoolPos.z+ApprHeight
    PTP PoolPos
end

def PutObjectD(Row, Col, No)
    pos PoolPos
    PoolPos.x = PoolCorner.x+Col*PoolStepV
    PoolPos.y = PoolCorner.y+Row*PoolStepH
    PoolPos.z = PoolCorner.z+No*ObjH
    PoolPos.a = PoolCorner.a
    PoolPos.b = PoolCorner.b

```

```

PoolPos.c = PoolCorner.c

PoolPos.z = PoolPos.z+ApprHeight
PTP PoolPos

PoolPos.z = PoolPos.z-ApprHeight
PTP PoolPos

PoolPos.z = PoolPos.z+ApprHeight
PTP PoolPos
end

def PutObjectC(ObjNo)
    posPyrPos ; Позиция гайки в пирамиде
    intLevel ; Ярус пирамиды
    intLevelNo ; Номер гайки в ярусе

PyrPos.x = PyrCenter.x
    PyrPos.y = PyrCenter.y
    PyrPos.z = PyrCenter.z
    PyrPos.a = PyrCenter.a
    PyrPos.b = PyrCenter.b
    PyrPos.c = PyrCenter.c

    if (ObjNo < 8) then
        ; 1. и 2-йярус
        if ((ObjNo == 0) or (ObjNo == 4)) then
            PyrPos.x = PyrPos.x-50
        else
            if ((ObjNo == 1) or (ObjNo == 5)) then
                PyrPos.x = PyrPos.x+50
            else
                if ((ObjNo == 2) or (ObjNo == 6)) then
                    PyrPos.y = PyrPos.y-50
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        PyrPos.a = 90
    else
        if ((ObjNo == 3) or (ObjNo == 7)) then
            PyrPos.y = PyrPos.y-50
            PyrPos.a = 90
        endif
    endif
endif
endif
endif
if (ObjNo > 3) then
    PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH
endif
else
if (ObjNo < 14) then
    if (ObjNo > 10) then
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*3
    else
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*2
    endif
    PyrPos.a = 90
    if ((ObjNo == 9) and (ObjNo == 12)) then
        PyrPos.y = PyrPos.y-50
    else
        if ((ObjNo == 10) and (ObjNo == 13)) then
            PyrPos.y = PyrPos.y+50
        endif
    endif
endif
else
if (ObjNo < 18) then
    if (ObjNo > 15) then
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*5
    else
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*4
    endif
endif

```

```

PyrPos.a = 90
if ((ObjNo == 14) or (ObjNo == 16)) then
    PyrPos.y = PyrPos.y-50
else
    PyrPos.y = PyrPos.y+50
endif
else
    if (ObjNo == 19) then
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*7
    else
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*6
    endif
endif
endif
endif
endif

PyrPos.z = PyrPos.z+ApprHeight
PTP PyrPos

PyrPos.z = PyrPos.z-ApprHeight
PTP PyrPos

PyrPos.z = PyrPos.z+ApprHeight
PTP PyrPos
end

def TakeObjectD(ObjNo)
    posPyrPos ; Позиция гайки в пирамиде
intLevel ; Ярус пирамиды
intLevelNo ; Номер гайки в ярусе

PyrPos.x = PyrCenter.x
PyrPos.y = PyrCenter.y

```

```

PyrPos.z = PyrCenter.z
PyrPos.a = PyrCenter.a
PyrPos.b = PyrCenter.b
PyrPos.c = PyrCenter.c

if (ObjNo < 8) then
    ; 1. и 2-йярус
    if ((ObjNo == 0) or (ObjNo == 4)) then
        PyrPos.x = PyrPos.x-50
    else
        if ((ObjNo == 1) or (ObjNo == 5)) then
            PyrPos.x = PyrPos.x+50
        else
            if ((ObjNo == 2) or (ObjNo == 6)) then
                PyrPos.y = PyrPos.y-50
                PyrPos.a = 90
            else
                if ((ObjNo == 3) or (ObjNo == 7)) then
                    PyrPos.y = PyrPos.y-50
                    PyrPos.a = 90
                endif
            endif
        endif
    endif
    if (ObjNo > 3) then
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH
    endif
else
if (ObjNo < 14) then
    if (ObjNo > 10) then
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*3
    else
        PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*2
    endif
endif

```

```

PyrPos.a = 90
if ((ObjNo == 9) and (ObjNo == 12)) then
    PyrPos.y = PyrPos.y-50
else
if ((ObjNo == 10) and (ObjNo == 13)) then
    PyrPos.y = PyrPos.y+50
endif
endif
else
if (ObjNo < 18) then
if (ObjNo > 15) then
    PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*5
else
    PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*4
endif
PyrPos.a = 90
if ((ObjNo == 14) or (ObjNo == 16)) then
    PyrPos.y = PyrPos.y-50
else
    PyrPos.y = PyrPos.y+50
endif
else
if (ObjNo == 19) then
    PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*7
else
    PyrPos.z = PyrPos.z+ObjH*6
endif
endif
endif
endif

PyrPos.z = PyrPos.z+ApprHeight
PTP PyrPos

```

```
PyrPos.z = PyrPos.z-ApprHeight
PTP PyrPos

PyrPos.z = PyrPos.z+ApprHeight
PTP PyrPos
end

def MiddlePoint()
  pos Point

  Point = {X -400, Y 600, Z 300, A 0, B 180, C 0}
PTP Point
end
```